

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique et de génie informatique

ARCHITECTURE DÉCISIONNELLE POUR LA CONDUITE COLLABORATIVE DE VÉHICULES AUTONOMES

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie électrique

Patrick FRENETTE

Jury : François MICHAUD (directeur)
Martin ROBERGE
Soumaya CHERKAOU

RÉSUMÉ

L'automobile est un moyen de transport de prédilection puisqu'elle confère beaucoup de liberté aux utilisateurs. Cependant, les coûts sociaux et économiques reliés aux accidents de la route, ainsi que les émissions polluantes produites par la combustion des hydrocarbures, représentent une problématique à laquelle le Réseau de centres d'excellence AUTO21 s'intéresse. Notamment, AUTO21 finance ce projet qui porte sur les architectures décisionnelles appliquées aux trains de véhicules. Un train de véhicule est un système de transport intelligent regroupant un ensemble de véhicules qui se suivent les uns derrière les autres, conservant une faible distance entre eux.

L'architecture DCD est une architecture décisionnelle complète avec communication bidirectionnelle responsable de la prise de décision distribuée d'un groupe de véhicules opérant au sein d'un train de véhicules. L'architecture réalise la plupart des manœuvres réalisables dans les trains de véhicules tels l'insertion ou le retrait d'un véhicule dans le train, ainsi que la gestion des situations d'urgences telles les collisions et la défaillance de certains capteurs.

La validation de l'architecture est effectuée avec un groupe de quatre robots mobiles équipés d'un système de positionnement relatif qui permet de localiser les véhicules les uns par rapport aux autres. Un ensemble de 18 scénarios de tests, couvrant un large éventail des situations susceptibles de survenir dans les trains de véhicules, est réalisé. Les résultats obtenus indiquent que la prise de décision des véhicules, ainsi que la coordination des véhicules via la communication sont robustes et permettent l'exécution des manœuvres attendues.

Mots-clés : architecture décisionnelle, automobile, robotique mobile, train de véhicules, véhicules autonomes

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. François Michaud, pour son soutien, ses encouragements, ainsi que la latitude qu'il m'a donnée dans la réalisation de cette maîtrise. Je remercie également M. Michaud et les dirigeants d'AUTO21 pour leur soutien financier ainsi que pour le sujet de recherche novateur qu'ils m'ont confié.

Je désire remercier Jason Griffith pour sa collaboration au projet et pour son magnifique accueil lors de ma visite à Saskatoon. Un merci particulier à Carle Côté pour tout ce qu'il m'a apporté durant la réalisation de ces travaux. Ses encouragements, la qualité de nos échanges et son amitié ont compté pour beaucoup dans le développement de mon potentiel. Carle m'a grandement aidé à rendre ce projet à terme et j'en suis très reconnaissant.

De plus, j'aimerais remercier Dominic Létourneau, Clément Raïevsky, Pierre Lepage, Daniel Labonté, François Pomerleau et tous les membres du laboratoire IntRoLab pour leur contribution, support technique et encouragements.

Finalement, j'exprime ma gratitude à ma famille et mes proches pour leur encouragements dans les périodes de doutes et les moments plus difficiles.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
2	SYSTÈMES DE TRANSPORT INTELLIGENT	5
2.1	Systèmes d'assistance au conducteur	5
2.2	Systèmes partiellement autonomes	6
2.3	Systèmes autonomes	6
2.4	Systèmes autonomes collaboratifs	8
3	ARCHITECTURES DÉCISIONNELLES DES SYSTÈMES INTELLI- GENTS	11
3.1	Caractéristiques et concepts fondamentaux	11
3.1.1	Stabilité des trains de véhicules	11
3.1.2	Stratégie d'espacement	14
3.1.3	Manœuvres des véhicules sur les infrastructures routières	15
3.1.4	Contrôle des déplacements	17
3.1.5	Communication entre les véhicules	20
3.2	Revue des architectures	21
3.2.1	Architectures des STI	21
3.2.2	Architectures pour des groupes de robots mobiles	25
4	ARCHITECTURE DÉCISIONNELLE POUR LA CONDUITE COLLABORATIVE	29
4.1	Couche comportementale	32
4.1.1	Description des stimuli	32
4.1.2	Description des comportements	33
4.1.3	Arbitration des comportements	36
4.2	Couche délibérative	36
4.2.1	Modélisation du système	37
4.2.2	États du système	38
4.2.3	Transitions entre les états	39
4.3	Sélection des comportements	42
5	MISE EN OEUVRE	45
5.1	Architecture matérielle	45
5.2	Architecture logicielle	48
5.2.1	Composants déployés sur chaque véhicule	49
5.2.2	Composants déployés sur l'ordinateur de contrôle	50
5.2.3	Comportements déployés dans l'implémentation	51
5.2.4	Arbitration et sélection des comportements	54
5.3	Performance du système LAMP	58

6	TESTS ET RÉSULTATS	63
6.1	Opération normale	64
6.1.1	Arrêt et départ	64
6.1.2	Changement de voie	68
6.1.3	Insertion et retrait	71
6.2	Opération lors d'une collision	78
6.2.1	Collision du meneur	80
6.2.2	Collision d'un membre	82
6.2.3	Collision en aval d'une insertion	82
6.2.4	Collision en amont d'une insertion	88
6.2.5	Collision en aval d'un retrait	88
6.2.6	Collision en amont d'un retrait	90
6.2.7	Collision sur le véhicule réalisant une insertion	92
6.2.8	Collision sur le véhicule réalisant un retrait	93
6.3	Opération lors d'une situation d'urgence	94
6.3.1	Signalement d'obstacle par le meneur	94
6.3.2	Sortie d'urgence d'un membre	95
6.3.3	Sortie d'urgence d'un membre en aval d'une insertion	98
6.3.4	Sortie d'urgence d'un membre en amont d'une insertion	99
6.3.5	Sortie d'urgence d'un membre en aval d'un retrait	101
6.3.6	Sortie d'urgence d'un membre en amont d'un retrait	102
6.3.7	Sortie d'urgence du véhicule de manœuvre pendant une insertion . .	102
6.4	Synthèse des résultats	104
7	DISCUSSION ET CONCLUSION	107
A	COMMUNICATION AU SEIN DE L'ARCHITECTURE	113
A.1	Départ	113
A.2	Arrêt	115
A.3	Insertion	115
A.4	Procéder à l'insertion	115
A.5	Collaboration à l'insertion	115
A.6	Retrait	116
A.7	Collaboration à un retrait	116
A.8	Collaboration sortie d'urgence	116
A.9	Fin de collaboration	117
A.10	Urgence	118
A.11	Obstacle	118
A.12	Vitesse	118
B	TESTS ET RÉSULTATS	119
	RÉFÉRENCES	147

LISTE DES FIGURES

2.1	Trains de véhicules présentant un débit de 6400 véhicules/h	9
3.1	Scénario d’insertion d’un véhicule dans un train	16
3.2	Scénario de retrait d’un véhicule d’un train	17
3.3	Architecture AHS [Horowitz et Varaiya, 2000]	23
3.4	Architecture de Tsugawa et coll. [Tsugawa <i>et al.</i> , 2000]	24
3.5	Schémas-moteurs utilisés pour Demo II [Arkin, 1998]	25
3.6	Architecture RCS utilisée dans le cadre du projet Demo III [Albus, 1998] .	26
3.7	Architecture EMIB [Michaud, 2002]	27
4.1	Architecture DCD	32
4.2	Comportements et arbitration	34
4.3	Transitions de la machine à états finis de la couche délibérative	40
5.1	Véhicules et environnement de travail	47
5.2	Composants logiciels de l’implémentation	48
5.3	Arbitration des comportements pour le meneur du train	54
5.4	Arbitration des comportements pour les véhicules autonomes	56
5.5	Performance du système LAMP	61
6.1	Distance de suivi entre les véhicules	66
6.2	Vitesse longitudinale des véhicules	69
6.3	Variation du ratio de la position désirée du meneur en fonction du temps .	70
6.4	Distances du suivi de véhicule en virage	72
6.5	Mouvement des véhicules dans le test d’insertion et de retrait.	74
6.6	Suivi de véhicule pendant le test d’insertion et de retrait	75
6.7	Vitesse linéaire et orientation des véhicules pendant le test de collision du meneur.	81
6.8	Mouvement des véhicules dans le test de collision d’un membre.	83
6.9	Vitesse linéaire et orientation des véhicules pendant le test de collision d’un membre	84
6.10	Mouvement des véhicules dans le test de collision en aval d’une insertion. .	85
6.11	Vitesse linéaire et orientation des véhicules pendant le test de collision en aval d’une insertion	87
6.12	Mouvement des véhicules dans le test de collision en amont d’une insertion. .	89
6.13	Mouvement des véhicules dans le test de collision en aval d’un retrait. . . .	90
6.14	Mouvement des véhicules dans le test de collision en amont d’un retrait. . .	91
6.15	Mouvement des véhicules dans le test de collision sur le véhicule réalisant une insertion.	92
6.16	Mouvement des véhicules dans le test de collision sur le véhicule réalisant un retrait.	93

6.17	Suivi de véhicule pendant le test d'évitement d'obstacle ou changement de voie distribué	96
6.18	Orientation des véhicules pendant le test d'évitement d'obstacle ou chan- gement de voie distribué	97
6.19	Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre. . .	98
6.20	Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'une insertion.	99
6.21	Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'une insertion.	100
6.22	Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'un retrait.	101
6.23	Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'un retrait.	103
6.24	Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence du véhicule de manœuvre pendant une insertion.	104
A.1	Séquence des messages lors d'une insertion	116
A.2	Séquence des messages lors du retrait d'un véhicule	117
A.3	Séquence des messages lors d'une sortie d'urgence	117

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Liste des manœuvres	16
3.2	Description des schémas-moteurs utilisés pour Demo II	25
4.1	Liste des manœuvres supportées par l'architecture DCD	31
4.2	Variables du modèle du système	37
4.3	Liste des états	38
4.4	Liste des transitions entre les états	41
4.5	Liste des dialogues et des transitions associées	43
4.6	Liste des transitions provenant de la rétroaction comportementale	44
4.7	Activation des comportements selon l'état du système	44
5.1	Mise en correspondance des capteurs avec les stimuli produient	46
5.2	Activation des comportements selon l'état du système pour le meneur du train	55
5.3	Activation des comportements selon l'état du système pour les véhicules autonomes	57
5.4	Performance du système LAMP	60
6.1	Messages échangés dans le test d'arrêt et départ.	65
6.2	Erreurs du suivi de véhicule en ligne droite	65
6.3	Erreurs du suivi de véhicule en changement de voie	71
6.4	Temps d'exécution des manœuvres.	78
6.5	Messages échangés dans le test de collision du meneur.	82
6.6	Messages échangés lors de la collision d'un membre.	83
6.7	Messages échangés lors du test de collision en aval d'une insertion.	86
6.8	Messages échangés dans le test d'évitement d'obstacle ou changement de voie distribué	95
A.1	Messages échangés entre les véhicules et l'expérimentateur	113
A.2	Messages échangés entre les véhicules	114
B.1	Messages échangés dans le test de l'insertion et du retrait (I).	119
B.2	Messages échangés dans le test de l'insertion et du retrait (II).	120
B.3	Transitions d'états dans le test de l'insertion et du retrait (I).	121
B.4	Transitions d'états dans le test de l'insertion et du retrait (II).	122
B.5	Transitions d'états dans le test de collision du meneur.	123
B.6	Transitions d'états lors de la collision d'un membre du train.	124
B.7	Transitions d'états lors du test de collision en aval d'une insertion.	125
B.8	Messages échangés lors du test de collision en amont d'une insertion.	126
B.9	Transitions d'états lors du test de collision en amont d'une insertion.	127
B.10	Messages échangés lors du test test de collision en aval d'un retrait.	128
B.11	Variation aux modèles pendant le test de retrait et collision en aval.	129

B.12 Messages échangés lors du test de collision en amont d'un retrait.	130
B.13 Transitions d'états lors du test de collision en amont d'un retrait.	131
B.14 Messages échangés lors du test de collision sur le véhicule réalisant une insertion.	132
B.15 Variation des modèles pendant le test de collision sur le véhicule réalisant une insertion.	133
B.16 Messages échangés lors du test de collision sur le véhicule réalisant un retrait.	134
B.17 Variation des modèles pendant le test de collision sur le véhicule réalisant un retrait.	135
B.18 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un membre.	136
B.19 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre. . .	136
B.20 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'une insertion.	137
B.21 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'une insertion.	138
B.22 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'une insertion.	139
B.23 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'une insertion.	140
B.24 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'un retrait.	141
B.25 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'un retrait.	142
B.26 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'un retrait.	143
B.27 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'un retrait.	144
B.28 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un véhicule s'insérant dans le train.	145
B.29 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un véhicule s'insérant dans le train.	146

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Depuis son invention en 1886 par l'allemand Karl Benz, l'automobile a pris un essor phénoménal. Avec la modernisation de l'automobile et le développement des infrastructures routières, l'automobile est devenue le moyen de transport le plus utilisé par l'humain. En 2005, plus de 19 millions d'automobiles sillonnaient les routes canadiennes¹. Ce chiffre indique que les trois quarts de la population canadienne en âge de conduire possèdent un véhicule automobile.

L'automobile est surtout appréciée pour l'autonomie dans les déplacements qu'elle confère à ses utilisateurs. Cette liberté de déplacement amène sa part d'inconvénients. Le premier inconvénient majeur de l'automobile est les coûts sociaux et économiques reliés aux accidents de la route. En 2002, les accidents de la route ont fait environ 1,2 million de morts et plus de 50 millions de blessés à l'échelle mondiale [Peden *et al.*, 2004]. Ces statistiques placent l'automobile au onzième rang des principales causes de mortalité chez l'humain. Une deuxième inconvénient de l'automobile est que les émissions produites sont une des principales sources de pollution de l'air².

Afin de réduire ces inconvénients, les gouvernements et les industries supportent des initiatives de recherche afin de trouver des solutions. Au Canada, la recherche dans ce domaine est réalisée dans le cadre du Réseau de centres d'excellence AUTO21, portant sur l'automobile du 21 siècle. L'objectif d'AUTO21 est d'augmenter la compétitivité de l'industrie canadienne de l'automobile. Une piste prometteuse de recherche consiste à développer des Systèmes de Transport Intelligents (STI) utilisant un ensemble de capteurs, d'algorithmes et d'actionneurs pour assister ou remplacer l'humain au volant de son véhicule. Avec les avancées technologiques des dernières années, un ordinateur est en mesure de traiter un très grand nombre d'informations plus rapidement que l'humain. Considérant qu'une erreur humaine est présente dans 90% des accidents, ces systèmes intelligents ont le potentiel de réduire le nombre d'accidents de façon considérable.

Il existe plusieurs types de STI dont les systèmes autonomes collaboratifs. Ce type de système utilise un média de communication permettant aux véhicules à proximité d'échanger des informations afin de coordonner leurs déplacements. Dans la littérature, le concept de

¹http://www40.statcan.ca/102/cst01/trade14a_f.htm, consulté le 5 avril 2006.

²http://en.wikipedia.org/wiki/Air_pollution, consulté le 5 avril 2006.

train de véhicules est utilisé pour faire référence aux systèmes autonomes collaboratifs. Un train de véhicules est un système formé par plusieurs véhicules qui se suivent les uns derrière les autres en conservant une faible distance entre eux. Ces trains de véhicules peuvent potentiellement augmenter le débit des infrastructures routières, ce qui permettrait de réduire les problèmes de congestion routière, d'économiser du carburant et de diminuer les émissions polluantes [Tan *et al.*, 1998].

Le présent projet de recherche a pour objectif de développer un système autonome collaboratif apte à coordonner les véhicules dans le type de train de véhicules novateur proposé par AUTO21. La particularité de ce train de véhicules est que le véhicule à la tête du train est conduit par un conducteur humain certifié. Ce type de train de véhicules est une étape intermédiaire dans le développement de trains entièrement autonomes. Les deux principaux avantages de cette approche sont qu'aucune modification aux infrastructures routières n'est requise et qu'elle utilise l'expérience du conducteur pour s'adapter aux conditions atmosphériques, à l'état de la route et à des situations difficilement détectables par les capteurs. Dans ce train de véhicules, les véhicules membres du train doivent être en mesure de suivre la trajectoire déterminée par le conducteur de façon autonome.

La réalisation d'un système autonome collaboratif est un défi d'envergure. Pour y parvenir, plusieurs composants doivent être intégrés dans un ensemble cohérent et homogène. Ces composants sont les capteurs, le média de communication, les actionneurs et les algorithmes nécessaires pour prendre des décisions intelligentes afin de contrôler les déplacements du véhicule de façon sécuritaire. Au niveau logiciel, l'architecture décisionnelle est l'élément central responsable d'intégrer et d'unir tous ces composants. Elle se définit comme la "structure organisée des composants logiciels qui permet à un robot ou à un agent de prendre des décisions et qui définit les propriétés cognitives de ce dernier"³. Appliquée au système automobile autonome et collaboratif, l'architecture décisionnelle est la structure intégrant les composants permettant de réaliser le contrôle intelligent du véhicule et de coordonner ses déplacements avec les véhicules à proximité.

Les recherches effectuées dans le domaine de la robotique mobile ont mis de l'avant un ensemble de théories et de paradigmes portant sur les architectures décisionnelles. Il existe trois grandes approches pour les architectures décisionnelles : l'approche délibérative, l'approche comportementale et l'approche hybride [Arkin, 1998]. L'approche délibérative utilise une représentation symbolique de l'environnement pour prendre une décision intelligente basée sur cette représentation. Généralement, ce type d'architecture est basé sur une hiérarchie où une couche plus élevée en abstraction commande une couche subordonnée.

³<http://www.granddictionnaire.com>, consulté le 12 avril 2006.

Ce type d'approche requiert de créer un modèle fidèle de l'environnement avant de déterminer comment contrôler le véhicule. La plupart des architectures des STI recensées dans la littérature sont basées sur cette approche.

L'approche comportementale n'utilise pas de représentation symbolique et complète de l'environnement. Elle utilise un ensemble de composants logiciels simples (les comportements) pour réagir directement aux informations obtenues des capteurs, sans tenter de les colliger. Cette approche permet de réagir rapidement aux changements de l'environnement et se compose de composant logiciel simple. De plus, le concept d'émergence est souvent lié à cette approche. L'émergence survient lorsque l'interaction des comportements entre eux permet à l'architecture de réaliser des fonctionnalités qui n'ont pas été directement traduites en algorithme. Les faiblesses de cette approche résident dans le fait qu'il est très difficile de garantir un comportement intelligent et stable de l'architecture dans tous les cas susceptibles de survenir en dynamique. Ces faiblesses rendent difficiles la conception d'une architecture pour les STI où la sécurité des passagers est en jeu.

L'approche hybride combine les approches délibératives et comportementales en tentant de profiter des qualités des deux architectures, et en minimisant leurs faiblesses. Dans ce type d'architecture, une interface est créée pour permettre aux couches délibératives et comportementales de s'échanger des informations. Cette approche fut utilisée pour réaliser un STI à l'Université de Sherbrooke [Michaud *et al.*, 2006]. Cette preuve de concept utilisait un groupe de trois véhicules autonomes équipés de caméra permettant à chaque véhicule d'identifier le véhicule qui le précède afin de le suivre. Les résultats de ce projet ont permis de réaliser les manœuvres d'insertion, de retrait et d'évitement de collision. L'objectif du présent projet est de poursuivre sur les fondations de cette preuve de concept, et de mettre en place une architecture décisionnelle complète avec communication bidirectionnelle pour la prise de décision distribuée d'un groupe de véhicules exécutant l'ensemble des manœuvres de train de véhicules. Concrètement, la recherche vise à identifier les informations nécessaires à la prise de décision, à diffuser ces informations entre les véhicules. Une attention particulière est posée sur la réaction désirée des véhicules en cas de situations d'urgences et de collisions.

L'identification des informations nécessaires à la prise de décision s'effectue de façon minimale. L'objectif est d'établir le minimum des informations nécessaires pour prendre des décisions de façon déterministe et fiable. Un ensemble de règles de conduite est utilisé pour déterminer le domaine des réponses que les véhicules peuvent avoir face à des situations définies. Cet ensemble de règles permet à un véhicule de déterminer avec exactitude les intentions des véhicules à proximité en fonction de la situation courante et de réagir en

conséquence. Le partage de ces règles permet de mettre en place une architecture déterministe qui, déployée sur l'ensemble des véhicules, assure la coordination d'un sous-ensemble des manœuvres généralement supportées par les STI.

Les chapitre 2 et 3 de ce mémoire présente l'état de l'art au niveau de la recherche dans les STI et au niveau des architectures décisionnelles. Le chapitre 4 présente l'architecture *Dynamic Collaborative Driving* (DCD) développée au niveau de ses abstractions et de l'approche conceptuelle. Le chapitre 5 présente l'implémentation sur un groupe de quatre robots mobiles à l'Université de Sherbrooke de l'architecture. Le chapitre 6 présente les tests réalisés et les résultats obtenus dans la validation de l'implémentation. Finalement, une discussion sur l'approche se retrouve au chapitre 7 ainsi que la conclusion du mémoire au chapitre 8.

CHAPITRE 2

SYSTÈMES DE TRANSPORT INTELLIGENT

Un système de transport intelligent (STI) est un système qui utilise des ordinateurs, des capteurs, des actionneurs et des liens de communication afin d'assister ou même remplacer l'humain au volant d'un véhicule automobile. Règle générale, tout système informatique intelligent repose sur une architecture décisionnelle. Les STI n'y font pas exception. L'architecture décisionnelle d'un STI est la structure organisée de l'ensemble des composants décisionnels qui permet au véhicule de prendre des décisions intelligentes afin d'assister le conducteur ou pour contrôler les déplacements du véhicule.

Outre AUTO21, plusieurs groupes de recherche à l'échelle mondiale étudient les STI. Les différentes initiatives proposées par ces groupes varient selon le degré d'autonomie accordée au système. Généralement, les STI se regroupent selon leur niveau d'autonomie en quatre catégories : les systèmes d'assistance au conducteur, les systèmes partiellement autonomes, les systèmes autonomes et les systèmes autonomes collaboratifs.

2.1 Systèmes d'assistance au conducteur

Les systèmes d'assistance au conducteur ne contrôlent pas les déplacements du véhicule. Ils colligent l'information reçue des capteurs et interagissent avec le conducteur du véhicule. L'interaction s'effectue à l'aide de voyants lumineux sur le tableau de bord ou à l'aide de signaux sonores qui sont émis dans l'habitacle du véhicule. Ces systèmes ont l'avantage d'être simples et requièrent peu de modifications aux véhicules pour fonctionner. Certains systèmes sont déjà commercialement disponibles.

C'est le cas du système d'avertissement des risques de collisions de la compagnie Eaton Vorad qui équipe plusieurs camions lourds aux États-Unis [Jones, 2001]. Ce système utilise un radar pour déterminer la distance séparant le camion du véhicule précédent. Si la distance est inférieure à une distance jugée sécuritaire, le conducteur est informé par un signal sonore. Un deuxième système disponible commercialement est le système de détection des changements de voie RALPH [Thorpe *et al.*, 1998]. Ce système avertit le conducteur quand il ne contrôle pas adéquatement son véhicule au centre de la voie. Ce système est particulièrement utile pour alerter un conducteur qui s'endort au volant.

2.2 Systèmes partiellement autonomes

Les systèmes partiellement autonomes laissent le contrôle du véhicule au conducteur, mais ils sont en mesure d'en prendre le contrôle sous certaines conditions. Les systèmes de régulation adaptatif de la vitesse sont en mesure de modifier la vitesse d'un véhicule pour respecter une certaine distance avec le véhicule qui le précède. Plusieurs véhicules lourds utilisent ces régulateurs intelligents et les propriétaires des compagnies de transport indiquent que le taux d'accident impliquant leur véhicule a chuté de près de 70% [Jones, 2001].

Un système partiellement autonome et plus ambitieux que les régulateurs adaptatifs de vitesse est le projet SPARC [Holzmann *et al.*, 2005]. Ce projet a été amorcé en janvier 2004 par DaimlerChrysler et ses partenaires. Il a pour objectif de développer un conducteur virtuel qui détermine l'accélération et l'effort de virage que le véhicule devrait appliquer pour avoir une conduite sécuritaire. Le conducteur fournit également les commandes d'accélération et de virage à l'aide du volant et de l'accélérateur. Cette redondance dans les commandes permet à un module décisionnel de comparer les deux ensembles de recommandations. Dans l'éventualité où le système détecte un risque d'erreur humaine ou une situation d'urgence, le module décisionnel ignore les commandes du conducteur et applique les recommandations du conducteur virtuel.

Globalement, les systèmes partiellement autonomes ont le potentiel d'être rapidement commercialisables et bien acceptés du grand public. L'article de Holzmann [Holzmann *et al.*, 2005] cite une étude allemande indiquant que 40% des accidents en Allemagne pourraient être évités avec ces systèmes ou avec les systèmes d'assistance au conducteur [Grendel, 1993].

2.3 Systèmes autonomes

Un système autonome est un système qui remplace totalement l'humain au volant de son véhicule. Il utilise les informations obtenues des capteurs pour prendre une décision sur la meilleure façon de contrôler le véhicule. Généralement, le système autonome coexiste avec le système de contrôle traditionnel du véhicule. Le contrôle automatique peut ainsi être activé ou désactivé selon les conditions de la route, la manœuvre à réaliser ou l'état du système autonome. Certains systèmes autonomes ont pour objectif de remplacer le conducteur pour certaines manœuvres complexes et d'autres visent à éliminer complètement le conducteur.

Un exemple est le système de stationnement automatique développé dans le cadre du projet Praxitèle [Laugier *et al.*, 1999]. Préalablement à l'activation du système de stationnement automatique, le conducteur doit positionner son véhicule parallèlement à place de stationnement libre. Une fois enclenché, le système réalise la manœuvre de façon autonome. La compagnie Toyota offre en option un système similaire sur leur modèle Prius. En Angleterre, 70 % des consommateurs de cette voiture achètent ce système⁴.

Les initiatives visant à remplacer complètement l'humain au volant de son véhicule sont nombreuses. Le *DARPA Grand Challenge* est une compétition soumettant des véhicules autonomes tout-terrains à un parcours de 300 km dans un désert du sud-ouest des États-Unis. En 2005, sur les 23 équipes inscrites, seulement cinq véhicules autonomes ont réussi le parcours⁵. Les causes d'abandons sont diverses : défaillance du logiciel, instabilité des contrôleurs moteurs, bris mécanique, sortie de route, enlèvement dans le sable et défaillance des capteurs. L'équipe gagnante en 2005 est celle de la Stanford University. Leur Volkswagen Touareg R5 utilisait la technologie GPS pour localiser le véhicule et un ensemble de capteurs (caméra, lasers, radar) pour percevoir l'environnement. Toute l'information obtenue par ces capteurs est fusionnée dans une carte de l'environnement afin de déterminer la trajectoire désirée du véhicule.

Bien avant la venue de ce concours, certains véhicules autonomes avaient déjà parcouru des milliers de kilomètres de façon autonome. En 1995, le projet NavLab 5 a parcouru 98,1% des 4560 km séparant Pittsburgh de San Diego en autonomie complète [Pommerleau et Jochem, 1996]. Au centre de ce projet, le système de vision RALPH permet d'extraire les lignes démarquant la voie et de déterminer l'écart du véhicule par rapport au centre de la voie. Une fois ces informations extraites, le véhicule est maintenu au centre de la voie. L'analyse de l'image permet également de détecter les véhicules à proximité afin de conserver une distance sécuritaire avec le véhicule précédent. Trois ans après la démonstration de NavLab5, le prototype ARGO a présenté des performances aussi convaincantes en parcourant plus de 1800 km en autonome sur les autoroutes italiennes [Broggi *et al.*, 1999]. L'approche utilisée par ce prototype est similaire à celle de NavLab. Deux caméras et un système de traitement d'images ont été utilisés pour détecter les lignes de la chaussée ainsi que la distance entre le véhicule et celui qui le précède. Ce système a initialement été conçu pour servir comme système d'assistance au conducteur pour l'avertir en cas de changement de voie. L'automatisation du véhicule de test a permis d'en faire un système autonome.

⁴[http ://www.engadget.com/2006/04/05/toyotas-self-parking-car-coming-soon-to-us/](http://www.engadget.com/2006/04/05/toyotas-self-parking-car-coming-soon-to-us/), consulté le 27 avril 2006.

⁵[http ://www.darpa.mil/grandchallenge05/gcorg/index.html](http://www.darpa.mil/grandchallenge05/gcorg/index.html), consulté le 3 juin 2008.

Cette couverture sommaire des systèmes autonomes illustre clairement la faisabilité technique de ces systèmes. Éliminant complètement l'humain, certains systèmes ont le potentiel d'éviter un plus grand nombre d'accidents que les deux types précédents de STI. Cependant, ces systèmes sont plus complexes et doivent bien réagir à toutes les situations susceptibles d'être rencontrées sur les infrastructures routières. La robustesse et la fiabilité sont des enjeux très importants dans le développement de ces technologies.

2.4 Systèmes autonomes collaboratifs

Les systèmes autonomes collaboratifs sont une extension des systèmes autonomes. Ces systèmes utilisent un média de communication pour échanger des informations afin de coordonner les déplacements des véhicules.

La forme de coordination la plus fréquemment rencontrée dans la littérature est celle du train de véhicules. Un train de véhicules est un système formé de plusieurs véhicules qui se suivent les uns derrière les autres en conservant une distance minimale entre eux. Cette distance minimale contribue à réduire la traînée aérodynamique des véhicules, ce qui diminue leur consommation de carburant [Barth et Norbeck, 1996; Zabat *et al.*, 1995]. Cette économie permet de réduire les émissions polluantes émises par les véhicules et contribuent à réduire l'impact nocif de l'automobile sur l'environnement. Le deuxième avantage des trains de véhicules est qu'ils permettent de maximiser le débit de véhicules circulant sur les infrastructures [Rajamani et Shladover, 1999].

Bien qu'un train de véhicules puisse être maintenu sans l'utilisation explicite d'un média de communication, il a été démontré que la communication entre les véhicules (CEV) permet d'en améliorer les performances. Principalement, l'utilisation de la CEV permet de réduire la distance à laquelle les véhicules se suivent à l'intérieur d'un train, ce qui permet une augmentation du débit des infrastructures routières. Une étude analytique a démontré qu'un débit de plus de 6400 véhicules/h est envisageable avec la CEV, contrairement à un débit de 3100 véhicules/h pour un système autonome n'utilisant pas la communication [Rajamani et Shladover, 1999]. La figure 2.1 présente la formation des trains permettant d'atteindre ce débit de 6400 véhicules/h. Chaque train de véhicules est séparé d'une distance de 60 m et est composé de dix véhicules qui se suivent à une distance de 6,5 m.

Un deuxième avantage de la CEV consiste à améliorer le confort des passagers à bord des véhicules. Le concept du confort des passagers fait référence aux variations de vitesse des véhicules. Un véhicule autonome qui accélère avec douceur sans réaliser de variation brusque de vitesse offre un bon confort aux passagers. À l'opposé, un système qui ne réussit

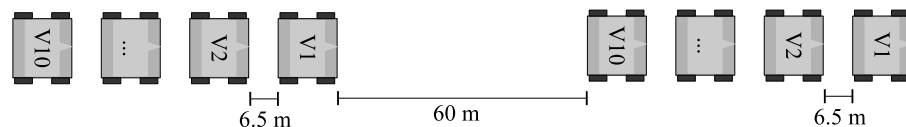


Figure 2.1 Trains de véhicules présentant un débit de 6400 véhicules/h

pas à conserver une vitesse stable ou qui varie brusquement la vitesse du véhicule n'offre pas un bon confort aux passagers. L'étude de Seto et Inoue [Seto et Inoue, 1999], ainsi que celle de Rajamani et Shladover [Rajamani et Shladover, 1999] démontrent le potentiel de la CEV afin d'améliorer le confort des passagers.

Un troisième avantage de la CEV consiste à propager de l'information de l'avant du train vers l'arrière. Lors de la démonstration de 1997 de la *National Automated Highway Systems Consortium (NAHSC)*, l'équipe de Thorpe et leurs véhicules NavLab 6 à 10 a réalisé un changement de voie automatique d'un train de quatre véhicules suite à la détection d'un obstacle par le premier véhicule du train [Thorpe *et al.*, 1998]. L'obstacle n'était pas encore à la portée des capteurs du second véhicule que la manœuvre de changement de voie était amorcée. Dans le même ordre d'idées, Briesemeister propose un protocole basé sur la CEV permettant de détecter la densité de la circulation [Briesemeister, 2001]. Avec ce protocole, la position d'un bouchon de circulation peut être identifiée et transmise aux véhicules qui se dirigent vers le bouchon afin qu'ils diminuent leur vitesse avant d'atteindre le point de congestion. Finalement, Hedrick *et al.* [Hedrick *et al.*, 2003] présentent des résultats expérimentaux démontrant l'efficacité d'un système de communication dans une situation de freinage d'urgence.

Plusieurs groupes de recherche ont réalisé des démonstrations de systèmes autonomes collaboratifs. Le précurseur est le groupe *Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*. En 1997, lors de la démonstration de la NAHSC, l'équipe du projet PATH a présenté huit véhicules autonomes qui collaboraient pour former un train de véhicules [Tan *et al.*, 1998]. La démonstration a été effectuée sur un segment de 12 km d'une autoroute dans la région de San Diego en Californie. Des aimants ont été fixés au centre des deux voies de ce segment d'autoroute pour assurer le contrôle latéral des véhicules. Les véhicules étaient en mesure de se joindre au train, de le quitter et de se suivre à une distance de 6,5 m. Les véhicules ont fonctionné entre six à huit heures par jour pendant trois semaines. La démonstration a également permis de prouver l'efficacité de la conduite collaborative par rapport aux performances humaines et à celles des systèmes autonomes. La distance de 6,5 m séparant chaque membre d'un train est beaucoup plus petite que la distance

envisageable par un système autonome ou par le plus qualifié des conducteurs humains qui a conduit les véhicules utilisés pour la démonstration [Rajamani et Shladover, 1999].

Malgré l'excellence des résultats obtenus lors de cette démonstration, l'approche de ce groupe est difficilement envisageable à grande échelle. Uniquement au Canada, il y a plus de 115 000 km d'autoroutes⁶. Ajouter des aimants dans la chaussée sur l'ensemble de ce réseau routier implique des investissements très importants. Cet inconvénient est également présent pour le concept des trains de véhicules de Toyota [Aoki *et al.*, 1995] qui utilise la même approche.

Une approche plus adaptée à la réalité du réseau canadien est celle de la National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) au Japon. La *Demo 2000 Cooperative Driving* a démontré la coordination d'un train de quatre véhicules avec une architecture décisionnelle ne nécessitant pas de changements majeurs aux infrastructures routières [Kato *et al.*, 2002]. La caractéristique principale de leur approche est l'utilisation d'un DGPS pour assurer le contrôle latéral des véhicules. Une série de coordonnées GPS formait un parcours que les véhicules suivaient. La seule modification apportée à l'infrastructure consistait à doter le parcours d'une station de référence GPS qui fournissait les corrections différentielles aux véhicules. Essentiellement, le GPS est une technologie en constante évolution qui sera sous peu en mesure de fournir un positionnement suffisamment précis pour être applicable dans les STI [Wang *et al.*, 2005]. Dans le cadre de cette démonstration, les quatre véhicules ont été en mesure de se coordonner via l'utilisation d'un système de communication dédié à l'application. Les commandes ou manœuvres exécutées étaient : la fusion de deux trains, la scission d'un train en deux entités, le départ et l'arrêt d'un train, le dépassement d'un véhicule, l'insertion d'un véhicule dans le train, le retrait d'un véhicule du train, le changement de voie et la détection d'obstacle.

⁶<http://nats.sct.gob.mx/Nats/>, consulté le 5 avril 2006.

CHAPITRE 3

ARCHITECTURES DÉCISIONNELLES DES SYSTÈMES INTELLIGENTS

Par définition, une architecture décisionnelle est une "structure organisée de l'ensemble des composants logiciels qui permet à un robot ou à un agent de prendre des décisions et qui définit les propriétés cognitives de ce dernier"⁷. À l'intérieur de l'architecture, chaque composant logiciel est responsable d'implémenter une fonctionnalité désirée de l'architecture. À titre d'exemples, un composant peut être développé pour implémenter un comportement d'évitement d'obstacle et un autre peut être développé pour gérer les communications avec d'autres robots ou d'autres agents. Ainsi, chaque composant a un rôle à remplir qui justifie sa présence dans l'architecture. Ce rôle est conceptuel et une abstraction est réalisable entre ce dernier et le choix des algorithmes nécessaires pour implémenter le rôle dans un langage de programmation.

Conséquemment, une même architecture décisionnelle peut être implémentée de façon différente selon les algorithmes choisis, les capteurs disponibles sur les véhicules utilisés et selon les contraintes de l'environnement dans lequel l'architecture est déployée. Cette section présente les caractéristiques spécifiques des architectures décisionnelles appliquées au STI et au domaine de la robotique mobile.

3.1 Caractéristiques et concepts fondamentaux

Préalablement à la présentation des architectures décisionnelles des STI, cette section introduit les caractéristiques et les concepts fondamentaux de ces architectures.

3.1.1 Stabilité des trains de véhicules

Dans le contexte de la régulation des procédés, la stabilité réfère à la capacité d'un système à retrouver son état d'équilibre suite à des perturbations. Un train de véhicules est un système composé de plusieurs véhicules qui sont eux-mêmes des systèmes complexes. Les études analytiques sur les trains de véhicules et la circulation routière ont permis de définir certaines conditions de stabilité applicables aux trains de véhicules. Ces conditions sont

⁷<http://www.granddictionnaire.com>, consulté le 12 avril 2006.

la stabilité de maille, la stabilité par rapport au meneur et la stabilité du train dans la circulation.

Préalablement à la définition de ces conditions de stabilité, le concept d'erreur d'espacement entre deux véhicules est introduit. Dans un train de véhicules, chaque véhicule vise à conserver une certaine distance avec le véhicule qui le précède. L'erreur d'espacement est définie par l'équation 3.1 où D_{mes} est la distance réelle séparant les véhicules et D_{des} est la distance désirée entre les deux véhicules.

$$\epsilon_{pos} = D_{mes} - D_{des} \quad (3.1)$$

La stabilité de maille (*string stability*) est une propriété d'un train de véhicules qui garantie que l'erreur d'espacement entre deux véhicules ne s'amplifie pas lorsqu'elle se propage vers l'arrière du train de véhicules [Rajamani et Shladover, 1999]. Le freinage soudain du véhicule à la tête du train cause une erreur d'espacement entre lui et le véhicule qui le suit. La stabilité de maille est satisfaite quand cette erreur s'atténue et n'amplifie pas l'erreur d'espacement des autres véhicules plus loin dans le train. Analytiquement, la stabilité de maille est garantie si toutes les erreurs d'espacements entre deux véhicules successifs d'un train respectent l'équation 3.2.

$$\frac{|\epsilon_i(t)|}{|\epsilon_{i-1}(t)|} \leq 1 \quad (3.2)$$

où $\epsilon_i(t)$ est l'erreur d'espacement entre le véhicule i et le véhicule précédent $i+1$, tandis que $\epsilon_{i-1}(t)$ est l'erreur d'espacement entre le véhicule $i-1$ et le véhicule i . Les études [Swaroop et Hedrick, 1999; Swaroop, 1997] traitent en détails de la stabilité de maille.

La stabilité par rapport au meneur (*leader-to-formation stability*) utilise la théorie des graphes pour établir des coefficients non linéaires décrivant la propagation de l'erreur d'espacement sur les membres d'une formation suite à une variation de la dynamique du meneur [Tanner *et al.*, 2004]. La formation désirée des membres du train est déterminée lors de la conception du système et les coefficients non linéaires sont utilisés pour déterminer les contrôleurs permettant de respecter la formation désirée. Ces coefficients permettent de contrôler la performance et la sécurité du système. Un système stable par rapport au meneur garantit que la propagation des erreurs s'effectue de façon bornée et contrôlée. Un système stable par rapport au meneur peut ne pas posséder la stabilité de maille. Ce

concept est principalement utilisé lors de la conception du système et il est difficile de l'évaluer expérimentalement sur un système existant.

La stabilité du train dans la circulation (*traffic flow stability*) évalue la réponse d'un train de véhicules aux variations de la densité de la circulation. Lorsqu'un véhicule accède ou quitte un segment de route, la densité des véhicules sur ce segment varie. Plus il y a des véhicules sur un segment, plus la circulation est dense. L'augmentation de la densité de la circulation devrait contribuer à l'augmentation du débit de véhicules puisque que le nombre de véhicules circulant sur le segment au même moment est plus élevé. Greenshields a étudié l'évolution du débit de véhicules en fonction de la densité de la circulation et a établi la relation suivante [Greenshields, 1934] :

$$q = v_t \rho \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right) \quad (3.3)$$

où q est le débit de véhicules, v_t la vitesse de la circulation du train et ρ est la densité de véhicules (véhicules/heure). Cette équation possède un maximum à une certaine densité $\rho_{critique}$. Pour les densités inférieures à $\rho_{critique}$, l'augmentation de la densité conduit effectivement à une augmentation du débit de véhicules. Cependant, une fois $\rho_{critique}$ atteint, l'augmentation de la densité contribue à diminuer le débit. C'est le phénomène de la congestion routière. Quand la densité atteint ρ_{max} , l'infrastructure est saturée et le débit de véhicules est nul.

La stabilité du train dans la circulation évalue la réponse du train aux changements de la densité de véhicules en circulation. Si un train de véhicules est perturbé par l'ajout de véhicules devant lui, la stabilité du train dans la circulation est présente si le train est en mesure de retrouver l'état (vitesse et espacement entre les véhicules) qu'il possédait avant la perturbation [Swaroop et Rajagopal, 1999]. La région de stabilité du train dans la circulation est la région des densités inférieures à $\rho_{critique}$. Cette densité critique dépend de chaque STI et détermine le débit maximal de véhicules pouvant circuler sur une infrastructure.

Ces trois conditions de stabilité permettent d'appliquer un cadre théorique permettant de critiquer et d'évaluer les performances des systèmes de transport intelligents proposés par la communauté scientifique. Principalement, ce cadre théorique s'applique sur le choix de la stratégie d'espacement.

3.1.2 Stratégie d'espacement

Une stratégie d'espacement (*spacing policy/range policy*) est une relation qui détermine la distance désirée séparant deux véhicules successifs. Cette distance désirée permet de déterminer l'erreur d'espacement entre un véhicule et son prédécesseur tel qu'indiqué par l'équation 3.1. Plus la distance d'espacement désirée est petite, plus les véhicules se suivent de près et plus le débit de l'infrastructure peut être maximal. Cependant, lorsqu'une faible distance sépare les véhicules, ces derniers ont moins de temps pour réagir en cas d'une défaillance quelconque d'un véhicule en avant du train.

Les stratégies d'espacements sont regroupées en deux catégories : les stratégies à distance constante et les stratégies à distance variable. Les stratégies à distance constante fixe la distance entre les véhicules indépendamment de la vitesse des véhicules. Puisque la distance reste fixe avec une augmentation de la vitesse, le temps de réaction disponible en cas de défaillance diminue également avec la vitesse. Cette catégorie de stratégies permet de maximiser le débit, mais possède des risques de collision plus élevés.

Swaroop et Hedrick [Swaroop et Hedrick, 1999] présentent une étude analytique de plusieurs stratégies à distance constante et identifient que pour atteindre la stabilité de maille, il est essentiel que chaque véhicule connaisse certaines informations sur la dynamique du véhicule précédent et sur celle d'un autre véhicule de référence situé en avant dans le train. La dynamique du meneur du train est habituellement utilisée comme dynamique de référence. Ainsi, la communication entre les véhicules (CEV) est nécessaire pour connaître les informations du meneur du train puisqu'elles ne peuvent pas être déterminées par les capteurs. Rajamani et Shladover [Rajamani et Shladover, 1999] estiment qu'un débit théorique de 6400 véhicules/h est réalisable avec cette stratégie. Ce débit est plus de trois fois supérieur au débit de 2000 véhicules/h actuellement obtenu sur les infrastructures.

La deuxième catégorie des stratégies d'espacement permet de varier la distance désirée entre les véhicules selon différents paramètres. Ces paramètres peuvent être la vitesse du véhicule, la capacité d'accélération du véhicule, les conditions météorologiques ou la condition de la chaussée. Dans cette catégorie, l'approche par temps constant est fréquemment utilisée par les régulateurs de vitesse adaptatifs. L'équation 3.4 définit cette approche.

$$D_{des} = A + T_s V_i \quad (3.4)$$

La constante A fixe la distance minimale à conserver entre les véhicules indépendamment de la vitesse v_i . Le terme T_s est une constante en seconde qui, proportionnellement à la

vitesse, contribue à augmenter la distance désirée entre les deux véhicules. La valeur de T_s détermine le temps nécessaire à un véhicule pour parcourir la distance le séparant du véhicule précédent. Swaroop et Rajamani [Swaroop et Rajagopal, 1999] estiment qu'il est impossible de maintenir un temps de suivi inférieur à 1 seconde à 108 km/h, ce qui se traduit par un débit de 3100 véhicules/h. Ce calcul théorique utilise un modèle linéaire du deuxième ordre pour modéliser les véhicules. Puisqu'un véhicule est un système hautement non linéaire, les auteurs de l'étude affirment que de meilleures performances sont envisageables avec l'utilisation d'un modèle plus fidèle de la dynamique des véhicules. En plus d'offrir un débit inférieur aux stratégies à distance constante, plusieurs études démontrent aussi que cette approche ne possède pas une bonne stabilité en circulation [Zhou et Peng, 2005; Swaroop et Rajagopal, 1999; Santhanakrishnan et Rajamani, 2003].

Un deuxième ensemble d'approches dans la catégorie des stratégies à distance variable est présenté dans les études [Zhou et Peng, 2005; Santhanakrishnan et Rajamani, 2003]. Ces approches consistent à utiliser des fonctions non linéaires de la vitesse pour déterminer la distance d'espacement entre les véhicules. Les résultats analytiques et les simulations de ces approches indiquent une meilleure stabilité en circulation et le respect de la stabilité de maille. Bien que l'augmentation de la stabilité en circulation présentée dans ces études contribue à maximiser le débit des infrastructures, aucune comparaison n'est réalisée avec les approches à distance constante.

Généralement, les stratégies à distance variable ont l'avantage de pouvoir être développées sans utiliser de média de communication. Ces approches sont donc envisageables pour les systèmes autonomes, alors que les approches à temps constant sont réservées aux systèmes autonomes collaboratifs. L'ensemble des stratégies d'espacement démontre des performances supérieures aux capacités des conducteurs humains, particulièrement sur leur stabilité en circulation [Zhou et Peng, 2005].

3.1.3 Manœuvres des véhicules sur les infrastructures routières

Une manœuvre est une série d'actions coordonnées permettant de réaliser un objectif ou d'atteindre un but. Le tableau 3.1 décrit les manœuvres que les véhicules doivent être en mesure de réaliser pour circuler sur les infrastructures routières. De plus, le tableau présente les manœuvres reliées à la collaboration des véhicules dans un train. Aucun STI existant dans la littérature ne supporte l'ensemble de ces manœuvres. Le sous-ensemble des manœuvres supportées et les approches utilisées pour les supporter sont deux caractéristiques qui varient selon les architectures les STI.

Tableau 3.1 Liste des manœuvres

Manœuvres au sein des infrastructures	Manœuvres au sein d'un train de véhicules
Accéder à l'infrastructure Quitter l'infrastructure Maintenir la vitesse Changer de voie Dépasser un véhicule Freiner d'urgence Éviter un obstacle Éviter une collision	S'insérer dans le train Quitter le train Fusionner deux trains Scinder un train en N trains Réagir d'urgence Sortir d'urgence Respecter la stratégie d'espacement

Dans les conditions d'opérations normales d'un train de véhicules, respecter la stratégie d'espacement est la manœuvre par défaut. Lorsque les membres du train se suivent à la distance désirée selon la stratégie d'espacement, le train est considéré dans un état de maintien de sa formation. Cet état est analogue au concept de régime permanent emprunté de la théorie du contrôle des procédés.

Pour poursuivre l'analogie avec le contrôle des procédés, un train de véhicules peut subir des perturbations. Plusieurs types de perturbations sont envisageables pour les trains de véhicules. La première source de perturbation est liée à la coordination des manœuvres au sein du train. L'exécution d'une manœuvre implique la coordination d'une série d'actions de la part du véhicule initiateur de la manœuvre et, potentiellement, d'un ou de plusieurs autres véhicules. À titre d'exemple, les scénarios des figures 3.1 et 3.2 illustrent la coordination nécessaire des véhicules pour des manœuvres d'insertion et de retrait d'un véhicule au sein du train.

Du moment où un véhicule initie une manœuvre jusqu'à la fin de cette manœuvre, le train est considéré en régime transitoire. Une manœuvre est complétée quand le train a retrouvé

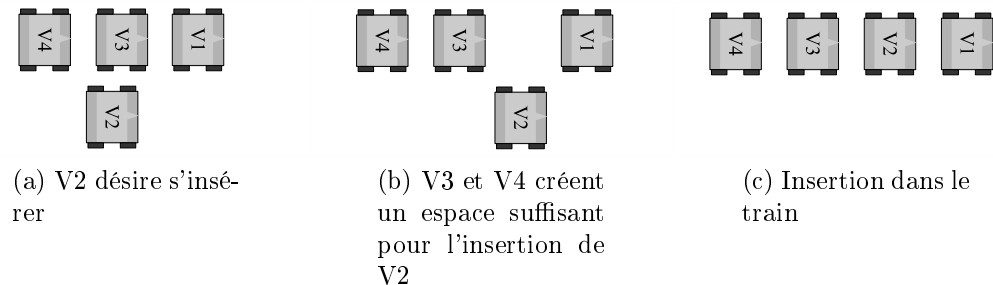


Figure 3.1 Scénario d'insertion d'un véhicule dans un train

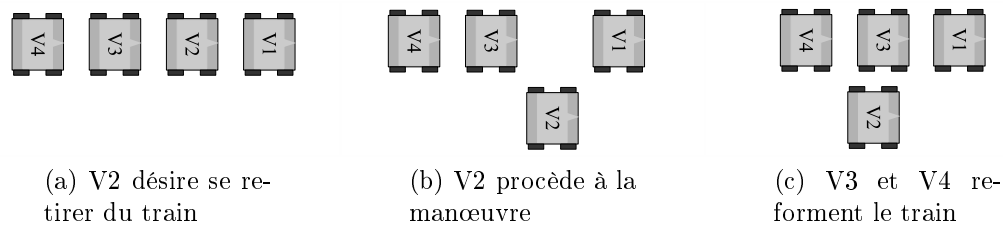


Figure 3.2 Scénario de retrait d'un véhicule d'un train

son état de maintien de la formation, c'est-à-dire que les véhicules respectent à nouveau la stratégie d'espacement.

Le deuxième type de perturbations que le train peut subir survient en situation d'urgence. Une situation d'urgence est identifiable par les caractéristiques suivantes :

1. un véhicule détecte la présence d'un obstacle (animal, débris sur la route, humain, etc.) sur la trajectoire du train ;
2. un véhicule connaît une défaillance quelconque qui l'empêche de se coordonner avec les autres véhicules ;
3. un véhicule détecte des conditions routières dangereuses tels que de la glace ou des trous dans la chaussées ;
4. une collision impliquant un ou plusieurs véhicules est survenue.

Contrairement aux perturbations causées par les manœuvres, qui sont des opérations normales au sein du train, les situations d'urgences sont imprévisibles et menacent la sécurité du train. Les manœuvres exécutées par les véhicules en réaction à ces situations d'urgences doivent éviter les accidents ou, dans les cas inévitables, minimiser les forces de l'impact pour réduire l'ampleur de l'accident et protéger le mieux possible les occupants du véhicule.

3.1.4 Contrôle des déplacements

Les STI partiellement autonomes, autonomes et autonomes collaboratifs sont en mesure de contrôler les déplacements du véhicule. Les déplacements s'effectuent selon deux axes de références : l'axe longitudinal et l'axe latéral.

Le contrôle de la vitesse d'un véhicule permet de contrôler son déplacement selon l'axe longitudinal. Le rôle d'un contrôleur longitudinal est de modifier la vitesse du véhicule en vue de maintenir la distance désirée entre lui et le véhicule qui le précède. Cette distance

désirée est définie par la stratégie d'espacement (section 3.1.2). Ainsi, un contrôleur longitudinal est un algorithme qui détermine la vitesse de déplacement du véhicule en vue de respecter la stratégie d'espacement. Au centre d'un contrôleur longitudinal se trouve le modèle du véhicule qui détermine les capacités de ce dernier. Un modèle simple du premier ordre permet de développer des contrôleurs moins performants que les modèles non linéaires plus fidèles à la dynamique réelle des véhicules. Huppé [Huppé, 2004] présente une synthèse et une critique des contrôleurs longitudinaux présents dans la littérature. Sa critique s'effectue selon le cadre théorique utilisé pour développer les contrôleurs. Les approches par linéarisation en retour de commande [Chien *et al.*, 1995; Oh *et al.*, 1999; Sheikholeslam et Desoer, 1989; Stankovic *et al.*, 2000; Warnick et Rodriguez, 2000] et celle par contrôle par mode de glissement [Spooner et Passino, 1997; Xiao-Yun Lu, 2000] ont été largement éprouvées sur de vrais véhicules.

Pour contrôler les déplacements du véhicule selon l'axe latéral, un deuxième contrôleur est utilisé. Son rôle est de maintenir le véhicule dans le corridor formé par les lignes de démarcation des voies de circulation et d'assurer la réalisation des manœuvres nécessitant des virages (changement de voie, insertion, retrait, réaction d'urgence, etc.). Le regroupement de ces contrôleurs peut s'effectuer par les méthodes utilisées pour déterminer la position du véhicule sur la chaussée.

Le premier groupe d'approche utilise des capteurs orientés vers la chaussée (*look-down systems*). Les magnétomètres utilisés dans les approches de PATH [Tan *et al.*, 2000] et de Toyota [Aoki *et al.*, 1995] sont des exemples typiques de ce groupe d'approches. Des aimants sont incrustés au centre de la chaussée et un magnétomètre évalue l'erreur en position par rapport au centre de la chaussée. La loi de commande du contrôleur latéral asservie le véhicule pour minimiser cette erreur. Cette approche a l'avantage de ne pas être affectée par les conditions météorologiques, mais nécessite l'installation d'aimants sur les infrastructures.

Le deuxième groupe d'approches utilise un système de capteurs orientés vers l'horizon (*look-forward systems*). Des caméras jumelées avec des algorithmes de traitement de l'image sont utilisées dans la plupart de ces systèmes. L'analyse des images de la caméra permet de déterminer les lignes de démarcation des voies sur la chaussée. La position du véhicule est asservie pour rester au centre de la voie. Les milliers de kilomètres parcourus par NavLav 5 [Pommerleau et Jochem, 1996] et ARGO [Broggi *et al.*, 1999] l'ont été avec ce type de système. Bien que ces systèmes soient peu dispendieux, ils sont sensibles aux changements d'éclairage et à l'état des lignes sur la chaussée. Dans un climat comme le Canada où la

neige et la glace recouvrent régulièrement les lignes, ces approches risquent d'être moins performantes.

Le dernier groupe d'approches utilise la technologie GPS et une connaissance de la géométrie de la route pour estimer la position du véhicule sur la chaussée. Dans le cadre de *Demo 2000 Cooperative Driving*, quatre véhicules ont été en mesure de circuler sur un circuit ovale sur lequel un parcours avait été préétabli [Kato *et al.*, 2002]. Le parcours était défini par une série de coordonnées GPS très précise augmentée par des corrections différentielles que les véhicules suivaient. Cette démonstration a illustré la possibilité d'utiliser le DGPS pour contrôler les déplacements latéraux des véhicules. Cependant, les infrastructures routières ne constituent pas un environnement contrôlé comme la piste ovale utilisée lors de cette démonstration, et l'installation de balise de correction DGPS sur l'ensemble du réseau routier nécessiterait un grand investissement.

À l'heure actuelle, sans les corrections différentielles et dans utilisation classique, le GPS n'offre pas une précision suffisante pour permettre la conduite automatisée. En effet, un groupe de quatre constructeurs automobiles et des partenaires ont réalisé le projet EDMap. Ce projet visait à déterminer le potentiel d'utilisation de cartes routières précises décrivant la géométrie des infrastructures en vue de les utiliser dans les STI [DaimlerChrysler, 2004]. L'étude a conclu que les cartes précises combinées avec la précision du positionnement GPS permettent d'identifier la voie dans laquelle un véhicule se trouve, mais elles n'offrent pas encore la précision nécessaire pour positionner le véhicule à l'intérieur de la voie. Dans son mémoire, Crawford [Crawford, 2005] propose une approche novatrice utilisant la technologie GPS sans corrections différentielles pour localiser un groupe de véhicules entre eux. En communiquant entre eux les informations reçues des différents satellites GPS, les véhicules sont en mesure d'estimer leur position relative par rapport aux autres véhicules à proximité avec une précision de l'ordre du centimètre.

Finalement, il est possible de combiner plusieurs approches complémentaires. Par exemple, Wang et coll. [Wang *et al.*, 2005] a démontré la combinaison d'un système de vision, d'un GPS et de cartes précises des routes pour réaliser le contrôle latéral d'un véhicule à l'intérieur des lignes démarquant une voie sur une autoroute. Cette approche permet de profiter des forces des deux systèmes combinés.

3.1.5 Communication entre les véhicules

La section 2.4 sur les systèmes autonomes collaboratifs a introduit les avantages de la communication entre les véhicules (CEV) qui permet à plusieurs systèmes autonomes de collaborer entre eux.

Dans le but de profiter des avantages offerts par la CEV, plusieurs aspects techniques doivent être traités. La technologie utilisée pour communiquer, la gestion de la topologie du réseau ainsi que le protocole de communication utilisé sont des considérations importantes dans l'utilisation de la CEV. Le rapport technique de Luo et Hubaux [Luo et Hubeaux, 2004] présente un survol de l'état de l'art sur ces aspects techniques. L'emphase des études existantes portent surtout sur la gestion de la topologie et sur les protocoles de communication. Les auteurs de ce rapport technique mentionne que peu d'études ont été réalisées sur la nature des informations à échanger pour assurer la coordination des manœuvres au sein d'un train de véhicules. À titre de ligne directrice, Godbole et coll. [Godbole *et al.*, 1996] identifient que l'état du groupe, la direction du train de véhicules, sa destination et l'état de chaque véhicule sont des informations utiles à échanger entre les véhicules.

Dans un STI, plusieurs véhicules partagent la même infrastructure routière. La coordination des véhicules entre eux est essentielle afin d'assurer des déplacements sécuritaires et coordonnés. Avant d'être autorisé à conduire un véhicule, l'humain reçoit une formation qui lui apprend les règles et l'éthique de la conduite automobile. Puisque les autres conducteurs appliquent également ces règles, la circulation sur les infrastructures s'effectue de façon coordonnée. Dans une architecture décisionnelle, cette coordination peut s'effectuer de trois façons : l'approche décentralisée, l'approche centralisée et l'approche distribuée [Arkin, 1998].

L'approche décentralisée établit l'action ou la manœuvre que le véhicule doit réaliser en se basant uniquement sur les informations obtenues de ses propres capteurs. Cette approche est la plus extensible des trois, puisque des véhicules peuvent être ajoutés dans l'environnement tout en conservant les fonctionnalités du système. Cependant, elle ne bénéficie pas des avantages de la CEV. Pallotino et coll [Pallottino *et al.*, 2007] a réalisé des expérimentations avec un groupe de trois robots afin de valider une stratégie de coopération décentralisée d'évitement d'obstacles dans lesquelles l'ensemble des véhicules partagent les mêmes règles de conduite.

L'approche centralisée utilise un système maître qui est responsable d'effectuer le processus décisionnel de tous les véhicules du système. Les systèmes esclaves reçoivent les commandes du système central via un lien de communication et les appliquent. Dans les STI centralisés

existants, le système maître est généralement le meneur du train ou une station de contrôle située sur l'infrastructure routière. Cette approche est moins extensible, car l'ajout de véhicules dans l'environnement complexifie le travail du système central. De plus, elle possède le désavantage que lorsqu'une défaillance survient sur le système maître, l'ensemble des véhicules du système perd la capacité de coordonner leur déplacement. Dans le cadre des STI, une défaillance peut mener à des accidents mettant la vie des passagers en jeu.

Dans l'approche distribuée, chaque système réalise son propre processus décisionnel en se basant sur les informations perçues par ses capteurs et par les informations reçues à l'aide de la CEV. Puisque qu'il n'y a pas de système central, cette approche permet d'utiliser la communication entre les véhicules pour connaître des informations utiles à la prise de décision qui ne sont pas accessibles dans une approche décentralisée. Les intentions, les informations obtenues des capteurs et la dynamique des véhicules à proximité sont des exemples d'informations qui peuvent être partagées entre les véhicules. Cette approche offre une plus grande robustesse que les deux autres, mais nécessite d'établir les mécanismes de coordinations entre les véhicules. Michaud [Michaud *et al.*, 2006] présente l'utilisation de la CEV à un groupe de robots mobiles dans le contexte des trains de véhicules. Différentes stratégies de coordination ont été utilisées pour réaliser les manœuvres d'insertion, de retrait et de réaction en cas de collision. L'étude conclut que la CEV permet une meilleure coordination des manœuvres versus une approche décentralisée qui n'utilise pas la CEV. De plus, l'augmentation des échanges entre les véhicules permet d'identifier explicitement l'état des véhicules ce qui facilite la coordination des manœuvres.

3.2 Revue des architectures

Cette section présente et critique les principales architectures décisionnelles appliquées aux STI et en robotique mobile. La robotique mobile est un domaine de recherche connexe au STI puisqu'au niveau du processus de la prise de décision et de la communication, les caractéristiques de ces deux types d'architectures sont similaires. Les principales différences entre les deux sont la dynamique des systèmes à contrôler et l'absence de contraintes non holonomes pour certains robots.

3.2.1 Architectures des STI

L'approche délibérative est l'approche la plus utilisée dans les architectures décisionnelles des STI. Cette approche est déterministe et les commandes motrices sont déterminées une fois l'ensemble des informations provenant des capteurs ou du média de communication

colligées. Les systèmes autonomes Navlab [Thorpe *et al.*, 1998] et ARGO [Broggi *et al.*, 1999] utilisent ce type d'architecture.

Au niveau des systèmes autonomes collaboratifs, l'architecture utilisée par le groupe PATH est également délibérative. L'objectif de ce groupe est de développer une autoroute automatisée (AHS). Le principe de leur AHS consiste à utiliser des stations de contrôle qui coordonnent la circulation sur un segment d'autoroute. Ces stations analysent la densité de la circulation et ordonnent aux trains présents sur le segment de réaliser des manœuvres (c.-à-d. changer de voie, séparer ou fusionner le train, respecter une vitesse de référence). À l'intérieur des trains de véhicules, le véhicule à la tête du train coordonne les autres véhicules en vue de réaliser les manœuvres commandées par la station de contrôle.

La figure 3.3 présente cette architecture hiérarchique qui utilise cinq couches réalisant des fonctionnalités différentes. La couche physique comprend tous les contrôleurs nécessaires pour contrôler le moteur, les freins, la transmission et la direction. De plus, cette couche fournit toute l'information obtenue des capteurs à la couche de régulation. La couche de régulation est responsable du contrôle latéral et longitudinal du véhicule. Le contrôle latéral des véhicules s'effectue à l'aide d'un magnétomètre qui détermine l'écart du véhicule par rapport au centre de la voie indiqué par des aimants incrustés dans la voie. Le contrôle longitudinal des véhicules s'effectue différemment selon la manœuvre commandée par la couche de coordination. L'établissement des manœuvres par la couche de coordination s'effectue selon le rôle de chaque véhicule dans le train. Par exemple, le meneur du train peut avoir comme consigne de maintenir une vitesse de déplacement, de se joindre à un autre train ou de réaliser un changement de voie. Ces consignes sont également valables pour un agent libre. Un agent libre est un véhicule circulant à proximité d'un train, mais qui n'en fait pas partie. Le dernier ensemble de manœuvres commandées par la couche de coordination concerne les véhicules suiveurs du train. Les suiveurs sont l'ensemble des véhicules qui ne sont pas agents libres ou meneur d'un train. Les manœuvres possibles pour les suiveurs sont de suivre leur meneur ou de quitter le train.

Il ressort de ce fonctionnement que la couche de coordination fonctionne différemment selon le rôle de chaque véhicule dans le train. Elle commande les manœuvres à la couche de régulation qui déterminera les commandes motrices à fournir à la couche physique. Ces trois couches de l'architecture sont présentes dans chaque véhicule. Les couches segments (*link*) et réseau (*network*) se situent au niveau des stations de contrôle de l'infrastructure routière. La couche segment est responsable de définir les plans que les meneurs de train et les agents libres doivent respecter assurer la coordination des véhicules sur un segment. Finalement, la couche réseau a une connaissance globale de l'infrastructure et indique aux

différentes couches segment comment réaliser leur contrôle pour maximiser l'efficacité globale de l'infrastructure. L'architecture AHS est donc délibérative et centralisée puisque l'établissement des manœuvres s'effectue au niveau de l'infrastructure. Les véhicules reçoivent un plan d'activité à appliquer et l'exécute. Les meneurs de chaque train possèdent également un rôle centralisateur. Ils ont la responsabilité de coordonner l'accomplissement des manœuvres de chaque membre du train. En cas de défaillance d'un de ces systèmes centraux, la stabilité du train n'est plus possible et les risques d'accidents augmentent.

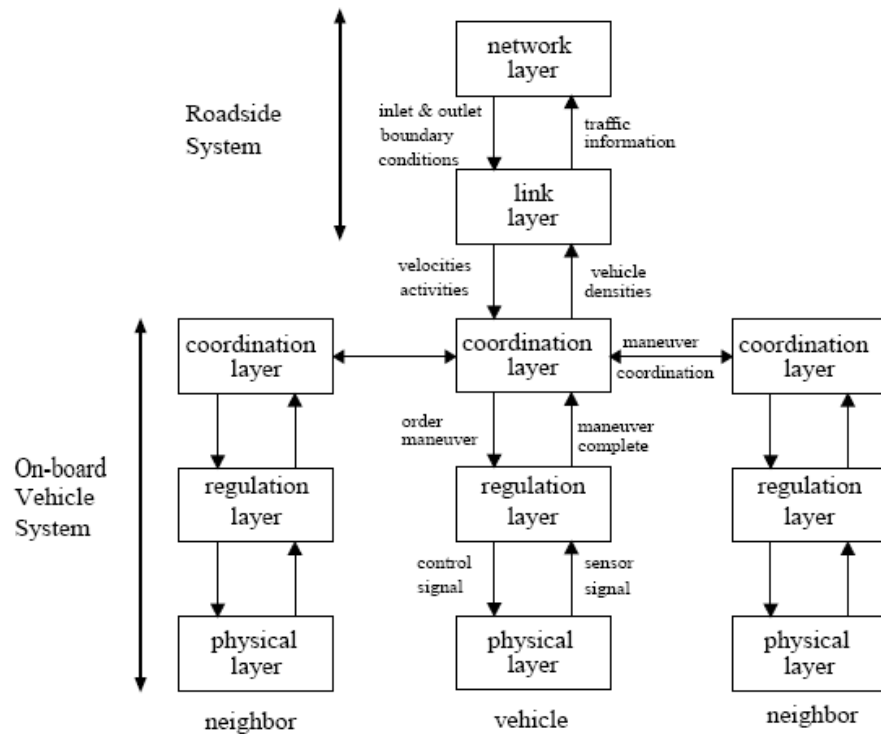


Figure 3.3 Architecture AHS [Horowitz et Varaiya, 2000]

Un autre exemple d'architecture délibérative est celle de Tsugawa et coll. [Tsugawa *et al.*, 2000]. Leur architecture, illustrée à la figure 3.4, utilise une couche de contrôle du véhicule qui analyse les informations des capteurs et les commandes reçues de la couche de gestion des véhicules. La couche de gestion gère la communication avec les autres véhicules. Finalement, la couche de contrôle de la circulation est intégrée à l'infrastructure routière. Cette couche fournit des indications sur la signalisation routière et sur les règles de conduite sur les infrastructures. Contrairement à l'architecture de PATH, cette couche ne commande pas directement les manœuvres (changements de voies, scission des trains, etc.). Elle fournit des indications que les véhicules considèrent dans leur processus décisionnel. De plus, le meneur du train n'a pas de rôle particulier par rapport aux autres véhicules membres

du train. Puisqu'aucun système central ne réalise des décisions pour d'autres systèmes, cette architecture est distribuée.

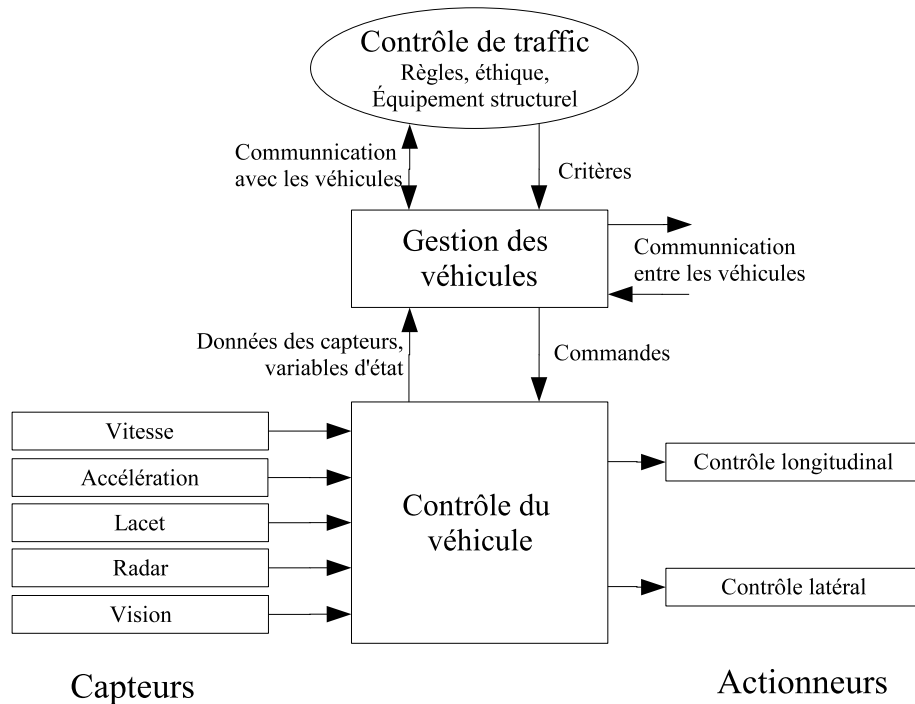


Figure 3.4 Architecture de Tsugawa et coll. [Tsugawa *et al.*, 2000]

Une autre architecture distribuée est celle utilisée dans le projet DEMO II. L'architecture de ce projet est une adaptation de l'architecture AuRa [Arkin et Balch, 1997] qui a été développée pour le contrôle de robot mobile. L'architecture hybride DEMO II utilise une couche délibérative hiérarchique et une couche comportementale utilisant des comportements de type schémas-moteurs. La figure 3.5 illustre les schémas-moteurs utilisés dans le cadre du projet DEMO II, et le tableau 3.2 explique leur rôle. Chaque schéma-moteur vote pour une vitesse et une correction angulaire. Un processus d'arbitrage sélectionne la vitesse et la correction angulaire qui a obtenu le plus de votes. Deux fonctions d'arbitrage (maintenir la vitesse et maintenir la rotation) fonctionnent en parallèle pour appliquer les commandes désirées sur les actionneurs des véhicules [Balch et Arkin, 1998]. L'architecture a été implantée sur quatre véhicules militaires et plusieurs formations de véhicules ont été maintenues dont la colonne qui est similaire au train de véhicules. Cette adaptation de l'architecture robotique AuRa aux véhicules militaires illustrent l'intérêt de transposer les connaissances acquises sur les robots mobiles pour les appliquer aux véhicules automobiles. L'utilisation de robots mobiles permet de valider les architectures avec des infrastructures réduites et à moindre coût.

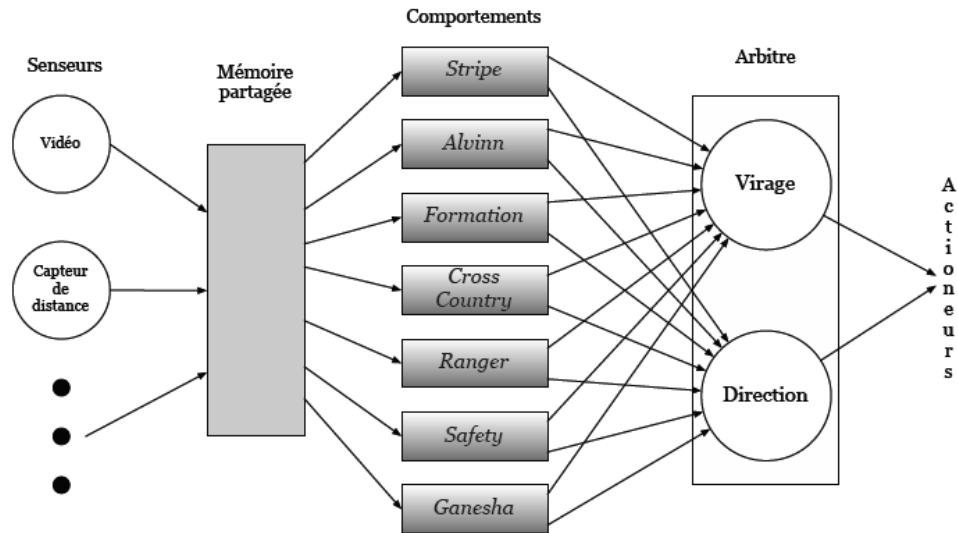


Figure 3.5 Schémas-moteurs utilisés pour Demo II [Arkin, 1998]

Tableau 3.2 Description des schémas-moteurs utilisés pour Demo II

Schéma-moteur	Description
Stripe	Comportement de téléopération
Alvinn	Comportement de navigation utilisant un réseau de neurones
Formation	Gestion de la formation entre plusieurs véhicules
Cross Country	Comportement de navigation utilisant les coordonnées GPS pour se localiser
Ranger	Comportement de navigation utilisant les données d'une carte géométrique et des capteurs (c.-à-d. : navigation à l'estime)
Safety	Détection et évitement d'obstacle à l'aide de caméras stéréoscopiques
Ganesha	Détection et évitement d'obstacle à l'aide de capteurs lasers

3.2.2 Architectures pour des groupes de robots mobiles

Il existe une panoplie d'architectures décisionnelles pour coordonner un groupe de robots. Lemay [Lemay, 2004] répertorie plusieurs de ces architectures décisionnelles pour les groupes de robots aptes à réaliser la formation colonne qui est semblable au train de véhicules. En vu de donner un aperçu des différentes approches du domaine de la robotique mobile, les architectures RCS et EMIB sont présentées.

L'architecture RCS est l'exemple classique d'une architecture délibérative. La figure 3.6 présente la structure hiérarchique de l'architecture appliquée au contrôle d'une plate-forme robotique militaire. Chaque couche possède un horizon temporel différent. La couche inférieure planifie les tâches à accomplir pour les prochaines 50 ms, alors que la couche

supérieure planifie pour un horizon beaucoup plus élevé. Chaque couche de cette architecture possède les mêmes composants : traitement des capteurs (SP), modélisation (WM) et la sélection des actions (BG). Selon la couche, un ensemble de capteurs est utilisé pour extraire de l'information de l'environnement (SP). Cette information sert à modéliser l'environnement (WM) qui conduit à la prise de décision sur les actions à entreprendre (BG). L'information circule entre les couches via la représentation de l'environnement qui est centrale à l'architecture. Cette architecture a été implantée avec succès sur un véhicule militaire dans le projet Demo III [Lacaze *et al.*, 2002; Albus, 1998].

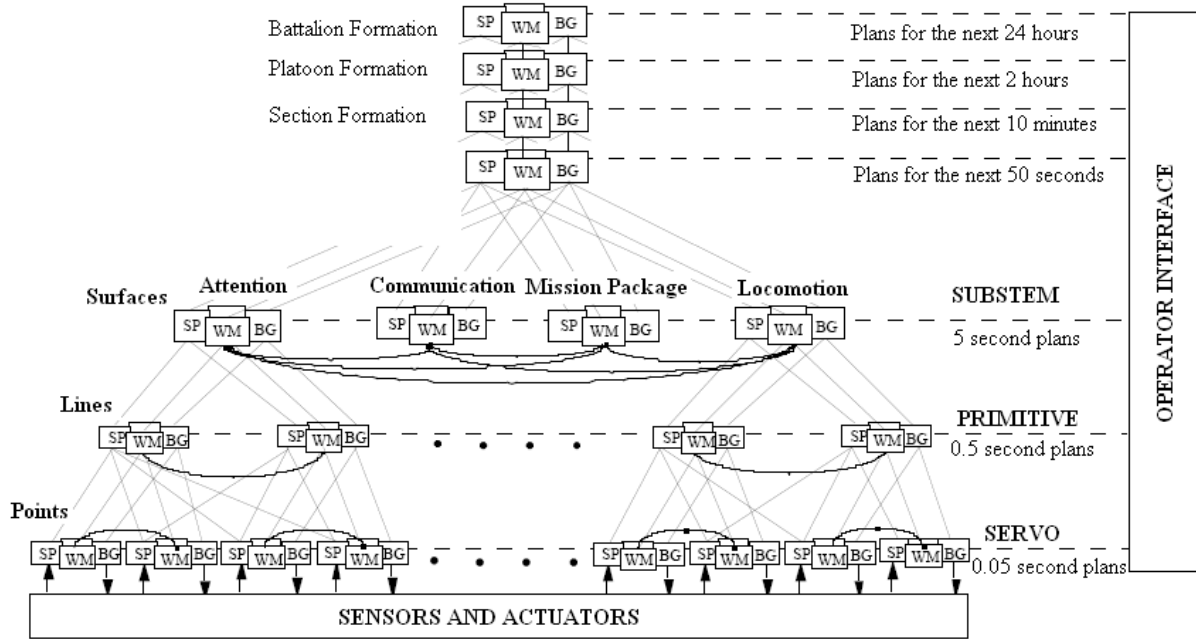


Figure 3.6 Architecture RCS utilisée dans le cadre du projet Demo III [Albus, 1998]

L'architecture EMIB [Michaud, 2002] est une approche comportementale composée de trois couches permettant la collaboration au sein d'un groupe de robots (figure 3.7). La couche supérieure gère les motivations du système. La couche centrale est composée de trois types de modules qui recommandent l'activation des comportements de la couche inférieure. Le module égoïste recommande l'activation des comportements qui permettent de satisfaire les objectifs du robot. Le module rationnel considère les autres robots et recommande l'activation des comportements profitables au groupe. Le module implicite recommande les comportements qui découlent naturellement de la situation du robot. Par exemple, s'il est en train de se recharger, il est inutile d'activer un comportement menant au déplacement du robot. Un processus de sélection détermine les comportements à activer. La couche comportementale utilise un mécanisme d'arbitration pour déterminer les commandes à appliquer aux actionneurs du robot.

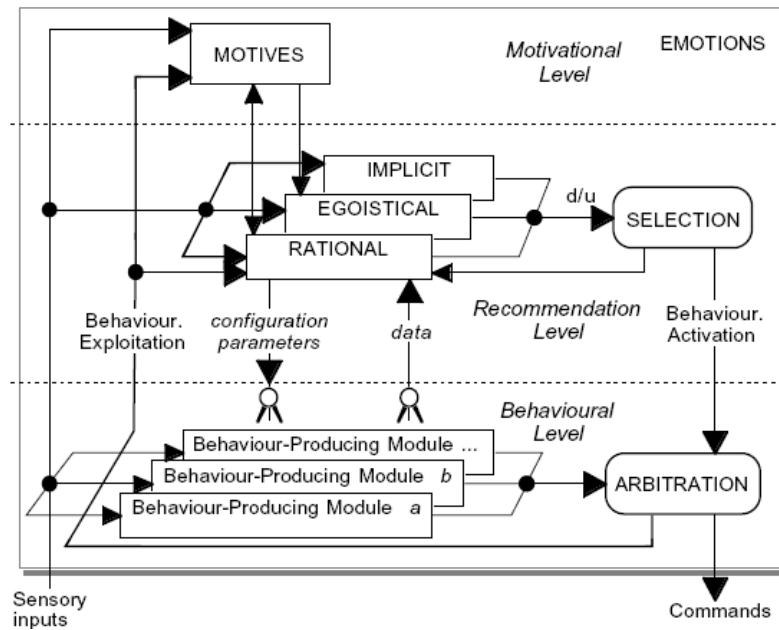


Figure 3.7 Architecture EMIB [Michaud, 2002]

Une implémentation réduite d'EMIB a été implémentée avec succès sur un groupe de trois robots mobiles se déplaçant en train de véhicules [Michaud *et al.*, 2006]. Au sein du train, les manœuvres d'insertion, de retrait et de réaction en cas de collision ont été réalisées. Pour y parvenir, une couche comportementale est commandée par un module rationnel qui gère la communication entre les véhicules et coordonne la manœuvre à exécuter. Les modules égoïste et implicite ainsi que la couche gérant les motivations du système n'ont pas été nécessaires pour supporter les manœuvres mentionnées.

CHAPITRE 4

ARCHITECTURE DÉCISIONNELLE POUR LA CONDUITE COLLABORATIVE

Rappelons qu’AUTO21 innove dans la recherche sur les STI en proposant une approche unique au niveau des trains de véhicules. La particularité de ce train de véhicules est que le véhicule à la tête du train est conduit par un conducteur humain certifié. Ce type de train de véhicules est une étape intermédiaire dans le développement de trains entièrement autonomes. Les deux principaux avantages de cette approche sont qu’aucune modification aux infrastructures routières n’est requise et qu’elle peut s’adapter à une multitude de situations difficilement prévisibles.

En effet, le conducteur à la tête du train de véhicule assure le contrôle latéral du train en circulant au centre de la chaussée, éliminant ainsi le besoin d’instrumenter l’infrastructure routière. Il fixe également la vitesse de déplacement longitudinale en fonction des conditions routières. L’expérience et le jugement du conducteur sont aussi mis à profit afin d’adapter le train à une multitude de situations qui sont difficiles à détecter à l’aide de capteurs. Par exemple, dans les pays nordiques comme le Canada, il est fréquent que de la neige recouvre les lignes de démarcation de la chaussée. Un conducteur expérimenté sera en mesure d’assurer le contrôle du véhicule, ce qui n’est pas évident pour les approches se basant sur le traitement d’images comme les projets NavLab et ARGO.

Ce type de train novateur a déjà été implémenté sur des robots mobiles à l’Université de Sherbrooke [Michaud *et al.*, 2006]. Le système utilisait un groupe de trois véhicules autonomes équipés de caméras permettant à chaque véhicule d’identifier le véhicule qui le précède afin de le suivre. Les résultats de ce projet ont permis d’établir une première preuve de concept en réalisant les manœuvres d’insertion, de retrait et d’évitement de collision. L’emphase du projet portait principalement sur l’étude du protocole de communication qui permet aux véhicules de coordonner leurs déplacements dans l’exécution des manœuvres.

L’objectif du présent projet est d’améliorer l’architecture et de valider que l’utilisation du paradigme des architectures hybrides peut être utilisé pour développer une architecture décisionnelle apte à réaliser les manœuvres au sein du train de véhicules d’AUTO21. L’emphase de la recherche porte sur les éléments suivants :

- l'identification des informations nécessaires à la prise de décision ;
- la diffusion des informations pertinentes aux composants de l'architecture ;
- la réaction aux situations d'urgences et aux collisions ;
- l'obtention de la position des véhicules dans l'environnement.

L'identification des informations nécessaires à la prise de décision est, jusqu'à présent, peu couvert dans les recherches sur les STI [Luo et Hubeaux, 2004]. L'objectif est d'établir les informations pertinentes à échanger entre les véhicules pour assurer leur coordination. L'approche consiste à définir un ensemble de règles de conduite connues de tous les véhicules régissant leur réponse face aux situations susceptibles de survenir dans l'opération du système. Cet ensemble de règles permet à un véhicule de déterminer avec exactitude les intentions des véhicules à proximité en fonction de la situation courante, et de réagir en conséquence. Le partage de ces règles permet de mettre en place une architecture déterministe qui, déployée sur l'ensemble des véhicules, assure la coordination d'un sous-ensemble des manœuvres des systèmes autonomes et des systèmes autonomes collaboratifs.

La diffusion des informations pertinentes aux différents composants de l'architecture vise à déterminer et à justifier la pertinence pour un composant de l'architecture d'accéder à une information. L'objectif est de conserver le plus grand découplage possible entre les composants de l'architecture et de minimiser les informations injectées en entrée à ces composants.

De plus, la preuve de concept initialement réalisée par Michaud et coll. [Michaud *et al.*, 2006] a amorcé l'étude d'une prise de décision intelligente lorsqu'un véhicule subit une collision ou une situation d'urgence. Le présent projet poursuit sur cet axe de recherche en déterminant les prises de décisions pouvant être réalisées avec un groupe de quatre véhicules. Plusieurs situations sont considérées afin de maximiser la robustesse de l'architecture dans ces conditions exceptionnelles.

Ce chapitre décrit l'architecture *Dynamic Collaborative Driving* (DCD) au niveau de son abstraction. Le mandat de l'architecture DCD est de coordonner les manœuvres à l'intérieur de l'approche des trains de véhicules d'AUTO21. Le tableau 3.1 présente l'ensemble des manœuvres susceptibles d'être supportées dans une architecture décisionnelle destinée aux systèmes autonomes collaboratifs. Les particularités du train de véhicules d'AUTO21 restreignent le nombre de manœuvres à supporter, car certaines ne s'appliquent pas. En effet, avant d'accéder à un train de véhicules, le véhicule est autonome, c'est-à-dire que son contrôle est assuré par le conducteur à bord du véhicule. Ainsi, les manœuvres pour

accéder et quitter l'infrastructure routière ne sont pas considérées. Idem pour la manœuvre de dépassement qui ne peut survenir, car les véhicules doivent suivre le meneur du train ou le véhicule qui les précède. Les manœuvres de fusion et de scission d'un train ne sont également pas supportées, car elles portent sur l'interaction de plus d'un train de véhicules, et ce concept sort du cadre de l'étude.

Le tableau 4.1 synthétise les manœuvres supportées dans l'architecture. Bien souvent dans la littérature, le terme manœuvre est employé avec une portée globale et fait référence aux changements de configuration du train de véhicules. Il est essentiel d'explicitier les actions localement réalisées par chaque véhicule impliqué dans une manœuvre ayant une portée globale (une insertion ou un retrait par exemple). Dans cette étude, le terme manœuvre est utilisée pour indiquer les actions localement réalisées par chaque véhicule. Ainsi, deux manœuvres, qui ne sont généralement pas explicitées dans la littérature, sont considérées dans l'étude. Il s'agit de la manœuvre de collaboration à une insertion et de collaboration à un retrait. L'insertion et le retrait d'un véhicule du train ont un impact sur les véhicules membres de ce train qui doivent coordonner leurs déplacements afin de permettre l'exécution de la manœuvre. Par exemple, dans le cas d'une insertion, le véhicule en amont du véhicule s'insérant dans le train modifie considérablement sa conduite en créant un espace suffisamment grand devant lui pour permettre l'insertion. Dans le cas d'un retrait, le véhicule cesse de suivre le véhicule qui quitte le train pour suivre le véhicule membre du train qui le précède. Tout au long de la manœuvre, le véhicule conserve une distance suffisamment grande pour permettre au véhicule quittant le train de s'y réinsérer. Ainsi, dans l'exécution d'une insertion ou d'un retrait, le meneur et le suiveur collaborent à la manœuvre et leurs considérations sont localement très différentes et sont explicitées dans le cadre de cette étude.

Tableau 4.1 Liste des manœuvres supportées par l'architecture DCD

Manœuvres au sein des infrastructures	Manœuvres au sein d'un train de véhicules
Maintenir la vitesse Changer de voie Freiner d'urgence Éviter un obstacle Éviter une collision	Mener le train S'insérer dans le train Quitter le train Réagir d'urgence Sortir d'urgence Respecter la stratégie d'espacement
	Collaborer à un retrait Collaborer à une insertion

L'architecture DCD réalise ces manœuvres en utilisant le paradigme des architectures décisionnelles hybrides. Ainsi, l'architecture est composée d'une couche délibérative responsable d'identifier la manœuvre à exécuter, et d'une couche comportementale responsable d'exécuter la manœuvre sélectionnée en s'ajustant aux stimuli de l'environnement dans lequel l'architecture est déployée. La figure 4.1 présente l'architecture ainsi que la nature des informations qui transitent entre les composants logiciels.

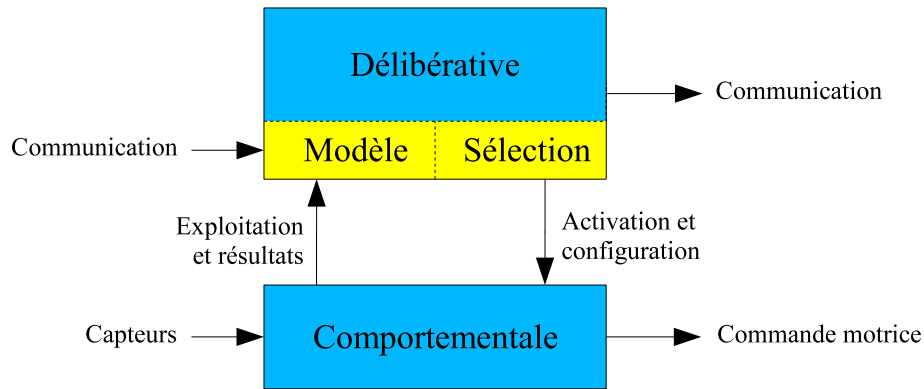


Figure 4.1 Architecture DCD

4.1 Couche comportementale

La couche comportementale regroupe l'ensemble des comportements dédiés à l'exécution d'une fonctionnalité précise de niveau opérationnel. Le regroupement et la configuration des comportements permettent l'émergence de comportements plus sophistiqués qui permettent l'exécution de la manœuvre commandée par la couche délibérative. Cette couche réagit le plus rapidement possible aux changements de l'environnement (perçus avec les capteurs) ainsi qu'aux demandes de la couche délibérative.

Cette section décrit les comportements sélectionnés pour l'architecture. De plus, le mécanisme d'arbitration utilisé sur cet ensemble de comportements est également défini. Préalablement à la description de ces deux éléments, l'ensemble des stimuli pouvant être injectés en entrée aux comportements est introduit.

4.1.1 Description des stimuli

Au niveau comportemental, un stimulus est une information qu'un comportement peut utiliser dans son algorithme interne afin de réaliser sa tâche. Les stimuli disponibles pour la couche comportementale dépendent des capteurs équipant les véhicules. Par exemple, un laser de proximité fournit une estimation des distances séparant le véhicule d'un élément

de l'environnement selon une résolution définie par le capteur. Ainsi, la couche comportementale est intrinsèquement liée aux capteurs utilisés sur les véhicules. Néanmoins, une abstraction des capteurs peut être réalisée, mais la nature des informations nécessaires à la couche comportementale doit être établie. C'est-à-dire que l'architecture peut s'implémenter avec différents capteurs tant et aussi longtemps que les stimuli nécessaires à la couche comportementale sont disponibles. De plus, il est probable que l'utilisation de certains capteurs ajoute des stimuli qui faciliteront l'implémentation de certains comportements. Ainsi, les stimuli présentés dans cette section sont le minimum requis pour déployer l'architecture, et ce peu importe les capteurs utilisés.

L'architecture DCD est développée en assumant que les véhicules sur lesquels l'architecture est déployée sont en mesure d'extraire les informations suivantes à partir de leurs capteurs : l'attitude du véhicule, la position relative des véhicules à proximité et l'estimation des distances séparant le véhicule des éléments de l'environnement. L'attitude d'un véhicule regroupe sa position globale dans l'environnement, son orientation par rapport au référentiel local du véhicule, sa vitesse linéaire et sa vitesse de rotation. La position relative des véhicules est exprimée par rapport au référentiel local de chaque véhicule. Par exemple, un véhicule A sait que le véhicule B est à sa droite et devant lui. Cependant, il ignore la position globale dans l'environnement du véhicule B. Spécifions que le système utilisé pour fournir la position des véhicules doit être omnidirectionnel, c'est-à-dire qu'un véhicule doit être en mesure de positionner les véhicules situés devant et derrière lui. Finalement, un capteur de proximité doit être présent sur les véhicules pour fournir l'estimation de la distance séparant le véhicule des éléments de l'environnement.

En plus de ces trois stimuli, la couche comportementale est stimulée par la couche délibérative qui active et configure les comportements (voir figure 4.1).

4.1.2 Description des comportements

Au sein de l'architecture, chaque comportement est un composant logiciel qui a un rôle précis à accomplir. L'exploitation en concurrence des comportements permet de contrôler le véhicule et de détecter des conditions particulières de l'environnement qui sont pertinentes à la prise de décision. La figure 4.2 présente les sept comportements utilisés dans l'architecture DCD. Une description fonctionnelle de chaque comportement ainsi que les descriptions des stimuli injectés en entrée sont présentées. Sur la figure 4.2, les stimuli inscrits en italique représentent les variables de configurations obtenues de la couche délibérative et les autres sont ceux obtenus des capteurs.

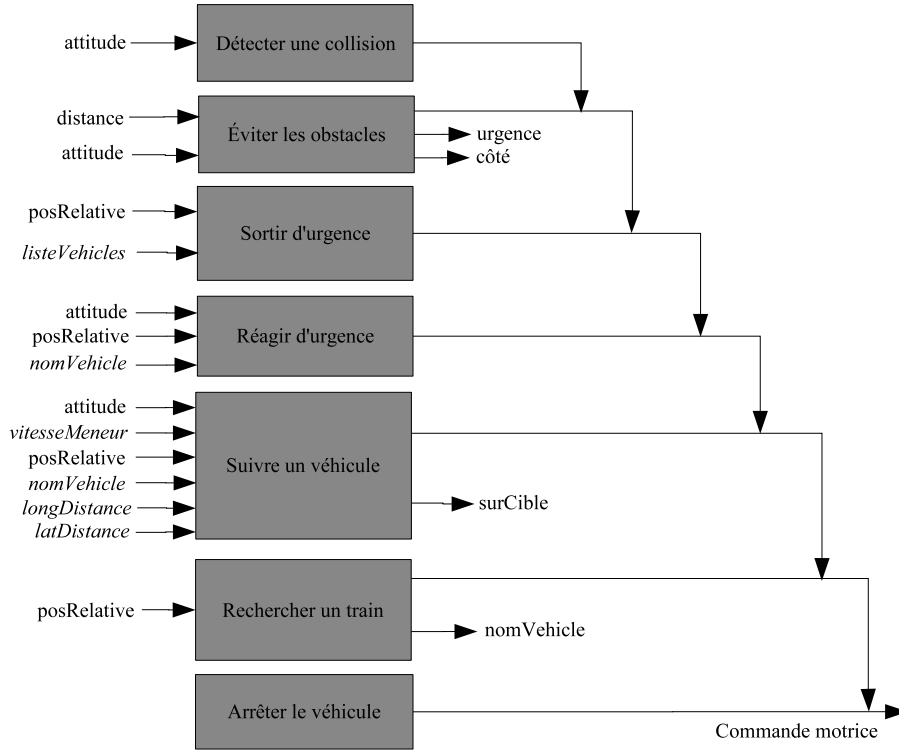


Figure 4.2 Comportements et arbitration

1. *Détecter une collision* a pour objectif d'analyser l'*attitude* du véhicule afin de déterminer si une collision ou une situation anormale surviennent. Dans l'éventualité où une telle situation survient, le comportement immobilise le véhicule le plus rapidement possible.
2. *Éviter les obstacles* utilise l'*attitude* du véhicule et l'estimation des distances (*distance*) entre le véhicule et les éléments de l'environnement pour détecter les obstacles à proximité. Suite à l'identification d'un obstacle, le comportement détermine une commande motrice afin que le véhicule évite d'entrer en collision avec l'obstacle. Dans certains cas, le comportement détermine que la collision est inévitable. Dans ce cas, il minimise la force de l'impact et signale la situation à la couche délibérative en activant une sortie nommée *urgence*. Le comportement possède aussi une sortie *côté* qui est utilisée pour déterminer de quel côté est l'obstacle à éviter.
3. *Sortir d'urgence* permet au véhicule de quitter un train de véhicules lorsque le système de positionnement fournissant la position relative des véhicules dans l'environnement (*posRelative*) connaît une défaillance. Sans l'information sur la position des véhicules à proximité, un véhicule ne peut plus coordonner ses déplacements avec les membres du train et il doit impérativement le quitter. La couche délibérative four-

nit la liste des véhicules (*listeVehicules*) dont la position est essentielle pour assurer la coordination du véhicule avec le train. Pour réaliser sa tâche, le comportement doit déterminer comment réaliser la sortie de façon sécuritaire avant de redonner le contrôle manuel du véhicule au conducteur. Les stimuli nécessaires pour y parvenir dépendent des capacités perceptuelles des véhicules sur lesquels l'architecture est déployée.

4. *Réagir d'urgence* a pour objectif de réagir efficacement lorsqu'un véhicule à proximité subit une collision. La réaction souhaitée dépend de la position du véhicule par rapport au lieu de la collision. Si la collision est derrière le véhicule, le comportement continue de suivre son meneur et s'immobilise en même temps que le meneur du train. Si la collision a lieu devant et que le véhicule peut s'immobiliser avant le lieu de la collision considérant sa dynamique, il s'immobilise d'urgence. Finalement, si le lieu de la collision est devant le véhicule et à proximité, le comportement évite le véhicule en collision et reforme le train avant de s'immobiliser. Pour réaliser sa tâche, le comportement accède à la position relative des véhicules à proximité (*posRelative*), à l'*attitude* du véhicule et il extrait l'identificateur du véhicule en collision (*nomVehicle*) de la commande comportementale.
5. *Suivre un véhicule* permet de conserver une certaine posture par rapport au véhicule à suivre. Une posture se traduit par deux distances à conserver avec le meneur. La première est selon l'axe latéral et la seconde est selon l'axe longitudinal du véhicule. Un changement dans la posture à conserver avec le meneur permet de réaliser les manœuvres d'insertion, de retrait et de suivi de véhicule. En effet, si un véhicule, suivant son meneur avec la posture (0 m ; 1 m), reçoit une nouvelle posture de référence (1 m ; 1 m), il se déplacera à la gauche du meneur tout en conservant la même distance selon l'axe longitudinal. Cet exemple illustre le changement de posture nécessaire pour commander la sortie du véhicule d'un train de véhicule. Évidemment, le comportement utilise la position relative des véhicules à proximité pour réaliser sa tâche (*posRelative*). L'orientation du véhicule contenu dans le stimulus *attitude* est également nécessaire. La configuration du comportement fournit la vitesse de croisière du train (*vitesseMeneur*), le nom du meneur (*nomVehicle*) et la posture à conserver par rapport à ce dernier (*longDistance* et *latDistance*). Finalement, le comportement active la sortie *alignement* quand le véhicule suit son meneur selon la posture désirée.
6. À partir des positions relatives des véhicules dans l'environnement (*posRelative*), *Rechercher un train* identifie quel véhicule peut servir de meneur. La détection d'un

meneur potentiel est essentielle afin de permettre l'insertion d'un véhicule dans le train. Une fois qu'un meneur a été identifié par le comportement, il utilise la sortie *nomVehicle* pour informer la couche délibérative du nom du meneur potentiel, et prend le contrôle du véhicule en conservant une position relative favorisant l'insertion, c'est-à-dire que le véhicule se situe dans la voie adjacente au train de véhicules, et se place entre son futur meneur et son futur suiveur (s'il existe). Préalablement à l'activation de ce comportement, le conducteur assume le contrôle de son véhicule. Ainsi, l'activation de ce comportement constitue la transition entre la conduite manuelle et la conduite automatique régulée par l'architecture DCD.

7. *Arrêter le véhicule* garde les véhicules à l'arrêt. Ce comportement est activé par défaut, et aucun stimulus n'est nécessaire pour commander l'arrêt du véhicule. Ainsi, si aucun comportement ne formule une commande, le véhicule est à l'arrêt par défaut.

4.1.3 Arbitration des comportements

L'arbitration entre les comportements s'effectue par ordre de priorité. Le comportement le plus prioritaire qui soumet une commande motrice est le comportement exploité. La commande motrice est une consigne interprétable par le contrôleur bas niveau du véhicule sur lequel l'architecture est déployée. Elle est constituée d'une vitesse longitudinale et d'une vitesse de rotation permettant de faire tourner le véhicule. La figure 4.2 présente la hiérarchie des comportements par ordre de priorité. À chaque itération, le nom du comportement exploité et ses sorties sont acheminés à la couche délibérative qui effectue la surveillance des manœuvres au sein du train. Puisque chaque comportement possède un stimulus activation, il n'est pas présenté sur la figure. Sur la figure, les termes *posRelative* et *distance* sont utilisés pour faire référence respectivement à la position relative des véhicules à proximité et à l'estimation des distances entre les éléments de l'environnement et le véhicule.

4.2 Couche délibérative

La couche délibérative utilise un modèle du système servant à colliger les informations en vue de déterminer la manœuvre à exécuter. Ce modèle est mis à jour par l'échange d'information entre les véhicules et par la rétroaction obtenue de la couche comportementale. En fonction de la manœuvre à exécuter, une fonction de sélection produit une commande comportementale qui contient l'activation et la configuration des comportements. Cette

commande est acheminée à la couche comportementale qui est responsable d'exécuter la manœuvre.

4.2.1 Modélisation du système

Pour réaliser le processus décisionnel, la couche délibérative utilise un modèle du système comme source d'information pour prendre la meilleure décision selon le contexte. Dans l'architecture DCD, le modèle est une structure de données qui regroupe un ensemble de variables. Chacune de ces variables représente une information essentielle à la prise de décision. Ces informations sont regroupées au tableau 4.2.

À chaque itération de la prise de décision, les messages reçus des autres véhicules ainsi que la rétroaction provenant de la couche comportementale permettent de mettre à jour le modèle. Une fois la mise à jour effectuée, la prise de décision s'effectue, c'est-à-dire que des messages peuvent être envoyés aux autres véhicules et une nouvelle commande est transmise à la couche comportementale. De plus, le processus décisionnel met à jour le modèle afin de sauvegarder les informations pertinentes pour les itérations futures.

Tableau 4.2 Variables du modèle du système

Variable	Description
Alignement	Booléen indiquant si le véhicule est correctement aligné avec son meneur ou avec un mur de l'environnement
Défaillance	Booléen indiquant si le véhicule connaît une défaillance
Dialogue	Nom du dialogue complété lors de la présente itération
Espacement	Booléen indiquant si le véhicule doit informer le véhicule de manœuvre que l'espace nécessaire pour l'insertion est créé
État	État actuel de la machine à états finis
Exploitation	Nom du comportement exploité
Meneur	Booléen indiquant si le véhicule est le meneur du train
Nom	Nom du véhicule
NomMeneur	Nom du meneur
NomSuiveur	Nom du suiveur
Obstacle	Côté où un obstacle a été détecté
ParamètreDialogue	Paramètre du dialogue complété
ParamètreManœuvre	Paramètre de la manœuvre exécutée
Urgence	Booléen indiquant si le véhicule connaît une situation d'urgence (c.-à-d. : collision)
VehiculeManœuvre	Nom du véhicule de manœuvre
Vitesse	Vitesse désirée du train de véhicule

4.2.2 États du système

Pour réaliser son processus décisionnel, la couche délibérative utilise une machine à états finis. La mise à jour du modèle stimule cette machine à états finis et cause des transitions d'un état à l'autre. Le choix des états et les transitions entre eux illustrent l'ensemble de la logique de la prise de décision. La prise de décision est donc déterministe, c'est-à-dire que les mêmes décisions sont toujours prises lorsque le même ensemble d'entrée stimule la machine à états finis.

Le tableau 4.3 présente l'ensemble des états de la machine à états finis utilisée. Pour justifier le choix des états, il est utile de revoir le tableau 4.1 qui synthétise les manœuvres supportées au sein de l'architecture. Les états *Meneur*, *Insertion*, *Membre*, *Retrait*, *Collaboration insertion*, *Collaboration retrait*, *Manœuvre d'urgence*, *Sortie d'urgence* et *Arrêt d'urgence* sont directement mis en correspondance avec une manœuvre supportée. Le maintien de la vitesse de déplacement ainsi que les changements de voie sont pris en charge par l'état *Membre* responsable de respecter la stratégie d'espacement. Ainsi, si le meneur du train change de voie, les véhicules vont tenter de respecter leur stratégie d'espacement, ce qui conduit à un changement de voie de la part des véhicules. L'évitement des collisions est effectué dans l'état *Manœuvre d'urgence*. L'état *Agent libre* traduit le mode de fonctionnement où un véhicule en conduite manuelle est à proximité d'un train de véhicules. Le début de la collaboration avec le train s'effectue dans l'état *Approche*. Dans cet état, le contrôle du véhicule est pris en charge par la couche comportementale et il est tenu à une distance sécuritaire favorable à l'insertion du véhicule dans le train. Finalement, l'état *Arrêt* est l'état par défaut dans lequel les véhicules sont immobilisés.

Tableau 4.3 Liste des états

État	Manœuvre
Agent libre	Conduire de façon autonome
Approche	S'approcher d'un véhicule
Arrêt	Immobiliser le véhicule
Arrêt d'urgence	Freiner d'urgence
Collaboration insertion	Collaborer à une insertion
Collaboration retrait	Collaborer à un retrait
Insertion	S'insérer dans le train
Manœuvre d'urgence	Réagir d'urgence
Membre	Respecter la stratégie d'espacement
Meneur	Mener le train
Retrait	Quitter le train
Sortie d'urgence	Sortir d'urgence

4.2.3 Transitions entre les états

Sous certaines conditions, le système permet des transitions d'un état à l'autre. Deux mécanismes permettent la transition entre les états. Le premier est la gestion des dialogues entre les véhicules, et le second est la rétroaction sur l'exécution des manœuvres obtenue de la couche comportementale. Préalablement à l'explication de ces deux mécanismes, la figure 4.3 et le tableau 4.4 décrivent l'ensemble des transitions d'états à l'intérieur de l'architecture DCD. Les transitions T14 à T18 ne sont pas présentées sur la figure 4.3. La liste suivante décrit où ces transitions s'appliquent :

- T14A est susceptible de survenir de tous les états à l'exception des états *Manœuvre d'urgence*, *Sortie d'urgence*, *Arrêt d'urgence*, *Agent libre* et *Arrêt* ;
- T14B est susceptible de survenir de l'état *Manœuvre d'urgence* ;
- T15 est susceptible de survenir de tous les états à l'exception des états *Arrêt* et *Agent libre* ;
- T16 à T18 sont susceptibles de survenir de tous les états à l'exception des états *Arrêt* et *Arrêt d'urgence* ;

Transition via la communication entre les véhicules

La coordination des manœuvres dans le système s'effectue par l'échange explicite de messages entre les véhicules. Dans le système, chaque véhicule est en mesure de communiquer avec le véhicule qui le précède (c.-à-d. : son meneur), avec celui qui le suit (c.-à-d. : son suiveur) et avec le véhicule qui exécute une manœuvre de retrait ou d'insertion. De plus, un véhicule en conduite autonome est en mesure d'établir la communication avec un véhicule membre du train.

Pour communiquer une information d'un véhicule à un autre, Michaud et coll. [Michaud *et al.*, 2006] identifient sept stratégies de coordination. Pour notre étude, la stratégie bidirectionnelle entre le véhicule de manœuvre, son meneur et son suiveur est utilisée. Cette stratégie de coordination permet de confirmer l'exécution des manœuvres en garantissant le respect des règles de conduite implémentées dans la machine à états finis. Par exemple, un véhicule qui demande à son meneur potentiel l'autorisation de s'insérer derrière lui peut se voir refuser la requête si le meneur potentiel est déjà en train de se coordonner avec un autre véhicule. Cette validation des règles de conduite est uniquement possible qu'avec une stratégie de coordination bidirectionnelle.

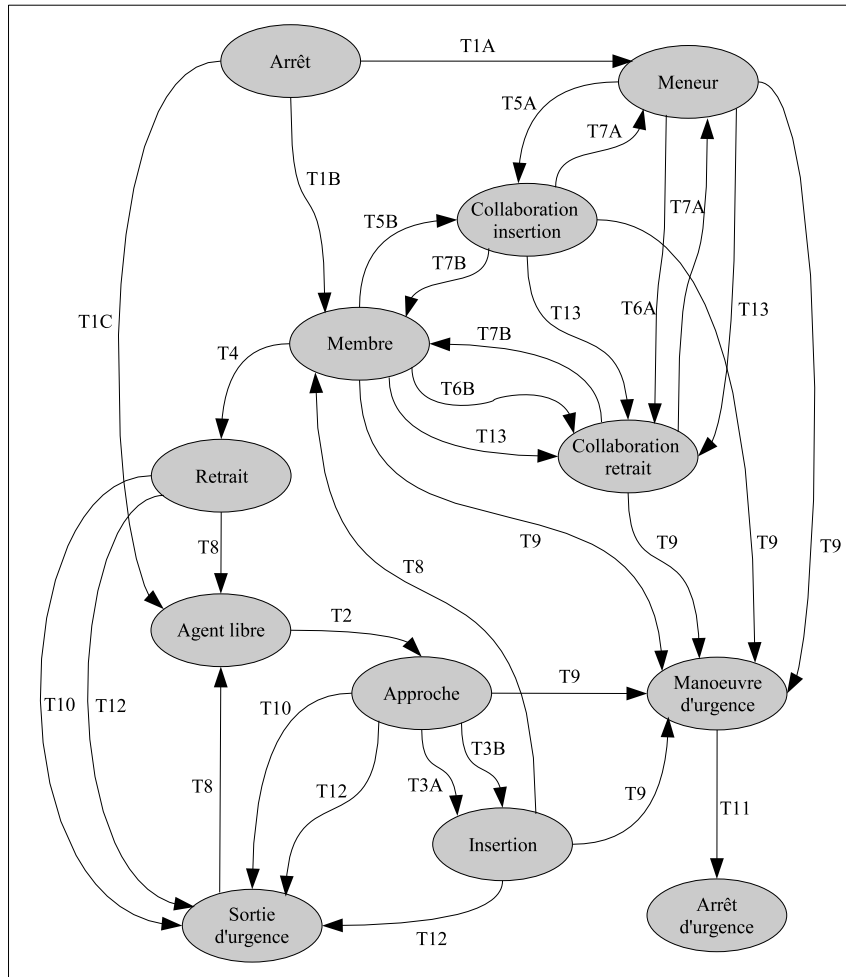


Figure 4.3 Transitions de la machine à états finis de la couche délibérative

Tableau 4.4 Liste des transitions entre les états

Transition	Description
T1A	Un véhicule à l'arrêt s'active en tant que meneur du train
T1B	Un véhicule à l'arrêt s'active en tant que membre du train
T1C	Un véhicule à l'arrêt s'active en tant qu'agent libre
T2	Un agent libre s'approche de son futur meneur
T3A	Le futur suiveur indique que l'espace nécessaire pour l'insertion est créé
T3B	Le véhicule est correctement aligné pour procéder à l'insertion et aucun futur suiveur n'est présent
T4	Un véhicule quitte le train
T5A	Le meneur du train collabore à une insertion
T5B	Un membre du train collabore à une insertion
T6A	Le meneur du train collabore à un retrait
T6B	Un membre du train collabore à un retrait
T7A	Le meneur du train termine sa collaboration à une manœuvre
T7B	Un membre du train termine sa collaboration à une manœuvre
T8	Le véhicule a atteint la position relative souhaitée par rapport à son meneur ou à un élément de l'environnement
T9	Réception d'un signal de collision nécessitant une manœuvre d'urgence
T10	Réception d'un signal de collision nécessitant une sortie d'urgence
T11	Réception d'un signal de collision nécessitant un arrêt d'urgence
T12	Réception d'un message de sortie d'urgence et effectue une sortie d'urgence à son tour
T13	Réception d'un message de sortie d'urgence et collabore à la manœuvre
T14A	Le véhicule connaît une défaillance et effectue une sortie d'urgence
T14B	Le véhicule connaît une défaillance et effectue un arrêt d'urgence
T15	Le véhicule subit une collision et effectue un arrêt d'urgence
T16	Le véhicule est commandé de s'immobiliser
T17	Le véhicule détecte un obstacle qu'il ne peut pas éviter et effectue un arrêt d'urgence
T18	Le véhicule reçoit un message d'évitement d'obstacle ne pouvant pas être évité et effectue un arrêt d'urgence

Au sein de l'architecture DCD, le concept de dialogue est introduit pour gérer la communication entre les véhicules. Un dialogue est une séquence de messages échangés entre deux véhicules. Les informations pertinentes à communiquer, via les dialogues, sont les intentions des véhicules (c.-à-d. : l'insertion, le retrait, l'approche et le retrait d'urgence), ainsi que les situations critiques (c.-à-d. : les obstacles et les collisions). L'introduction du concept de dialogue permet de faire un découplage conceptuel entre les différents messages concrètement échangés entre les véhicules et l'intention derrière l'envoi de ces messages. Lorsqu'un dialogue est correctement exécuté, la machine à états finis est stimulée et des transitions d'états peuvent survenir dépendamment de l'état actuel du système. Le tableau 4.5 introduit les dialogues identifiés permettant de communiquer toutes les informations nécessaires au sein de l'architecture, et présente les transitions entre les états associés. Considérant que l'architecture est développée dans un contexte de recherche, un ordinateur de contrôle est utilisé pour initier les expériences. Cet ordinateur contrôle les expériences et commande les véhicules d'exécuter les manœuvres d'insertion et de retrait. Cet ordinateur est un acteur périphérique à l'architecture et son rôle est explicité au chapitre suivant. L'annexe A présente le détail des messages envoyés entre les acteurs et leurs séquencements à l'intérieur de chacun des dialogues.

Transition via la rétroaction de la couche comportementale

La rétroaction de la couche comportementale vers la couche délibérative peut modifier l'état du système au même titre que les dialogues. Le tableau 4.6 présente ces changements d'états. Considérant l'état courant du véhicule, l'exploitation du comportement jumelé avec la présence d'une sortie cause une transition qui amène le véhicule dans l'état final. Si le comportement *Sortir d'urgence* est exploité, le véhicule n'est plus en mesure de se coordonner adéquatement avec le train puisqu'il connaît une défaillance. Dans ce cas, les transitions T14A et T14B surviennent et le véhicule effectue un arrêt ou une sortie d'urgence.

4.3 Sélection des comportements

Dans l'architecture DCD, la couche délibérative est en mesure d'interagir avec la couche comportementale à l'aide d'une fonction de sélection qui produit une commande comportementale. Cette fonction permet de définir la configuration dynamique permettant à chaque comportement de réaliser leur objectif. De plus, elle permet de sélectionner parmi les comportements disponibles un sous-ensemble de comportements selon l'état du système. Le tableau 4.7 présente les comportements activés en fonction de l'état du système.

Tableau 4.5 Liste des dialogues et des transitions associées

Nom	Information véhiculée	Transition
Départ	L'ordinateur de contrôle commande le début de l'expérience	T1A, T1B, T1C
Arrêt	L'ordinateur de contrôle commande la fin de l'expérience	T16
Insertion	L'ordinateur de contrôle commande une insertion	T2
Retrait	L'ordinateur de contrôle commande le retrait d'un véhicule du train	T4
Collaboration insertion	Un véhicule est sollicité pour collaborer à une insertion	T5A, T5B
Procéder à l'insertion	Le véhicule collaborant à l'insertion informe son futur meneur que l'espace nécessaire pour l'insertion est disponible	T3A
Collaboration retrait	Un véhicule est sollicité pour collaborer à un retrait	T6A, T6B
Collaboration sortie d'urgence	Un véhicule est sollicité pour collaborer à une sortie d'urgence	T12, T13
Fin de collaboration	Fin de la manœuvre à laquelle un véhicule collaborait	T7A, T7B
Urgence	Un véhicule signale qu'il connaît une situation d'urgence telle une collision	T9, T10, T11
Obstacle	Un véhicule signale la présence d'un obstacle qui ne peut pas être évité à son suiveur	T18
Obstacle	Un véhicule signale la présence d'un obstacle qui peut être évité à son suiveur	-
Vitesse	La vitesse du train de véhicule	-

Tableau 4.6 Liste des transitions provenant de la rétroaction comportementale

État courant	Comportement exploité	Sortie du comportement	Transition	État final
Approche	Suivre un véhicule	surCible	T3	Insertion
Insertion	Suivre un véhicule	surCible	T8	Membre
Retrait	Suivre un véhicule	surCible	T8	AgentLibre
SortieUrgence	Rechercher un train	-	T8	AgentLibre
Meneur	Sortir d'urgence	-	T14B	ArrêtUrgence
ManœuvreUrgence	Sortir d'urgence	-	T14B	ArrêtUrgence
Suiveur	Sortir d'urgence	-	T14A	SortieUrgence
Insertion	Sortir d'urgence	-	T14A	SortieUrgence
Retrait	Sortir d'urgence	-	T14A	SortieUrgence
CollInsertion	Sortir d'urgence	-	T14A	SortieUrgence
CollRetrait	Sortir d'urgence	-	T14A	SortieUrgence
Approche	Sortir d'urgence	-	T15	ArretUrgence
Toutes sauf Arrêt et ArrêtUrgence	Détecter une collision	-	T15	ArretUrgence
Toutes sauf Arrêt et ArrêtUrgence	Éviter les obstacles	urgence	T17	ArrêtUrgence

Tableau 4.7 Activation des comportements selon l'état du système

		Comportements						
		Détecter une collision	Éviter les obstacles	Sortir d'urgence	Réagir d'urgence	Suivre un véhicule	Rechercher un train	Arrêter le véhicule
États	Meneur	Aucun						
	Agent libre	X					X	X
	Approche	X	X	X		X		X
	Insertion	X	X	X		X		X
	Membre	X	X	X		X		X
	Retrait	X	X	X		X		X
	Collaboration insertion	X	X	X		X		X
	Collaboration retrait	X	X	X		X		X
	Arrêt	X						X
	Arrêt d'urgence	X						X
	Manœuvre d'urgence	X	X	X	X	X		X
	Sortie d'urgence	X	X	X				X

CHAPITRE 5

MISE EN OEUVRE

L'architecture théorique présentée au chapitre 4 peut se spécifier selon l'environnement, les véhicules utilisés et les capteurs équipant ces véhicules. Ce chapitre présente l'implémentation de l'architecture DCD avec des robots mobiles à l'Université de Sherbrooke. Cette implémentation constitue la première validation de l'architecture. La deuxième étape consistera à adapter l'architecture pour la faire fonctionner sur un groupe de tracteurs agricoles du Department of Agricultural and Bioresource Engineering de l'University of Saskatchewan. L'utilisation de ces tracteurs agricoles permettra de développer des contrôleurs bas niveaux sur des véhicules se rapprochant de la dynamique des véhicules automobiles. Bien que cette deuxième étape sort du cadre de la présente recherche, elle influence les requis considérés dans l'implémentation de l'architecture.

5.1 Architecture matérielle

Bien que le projet soit relié aux domaines de l'automobile, la mise en œuvre de l'architecture ne s'effectue pas sur des automobiles. L'utilisation d'automobiles pour réaliser la preuve de concept de l'architecture aurait demandé des investissements, des mesures de sécurités et une logistique exagérés à ce stade de la recherche. Par conséquent, la validation de l'architecture s'effectue sur des robots mobiles. Malgré le fait que les robots mobiles ne peuvent pas simuler la dynamique des automobiles comme le fait les simulateurs, les robots mobiles possèdent l'avantage d'être contraints aux réalités de l'environnement dynamique telles la limitation et l'imprécision de la perception, la latence dans les communications, la puissance de calcul limitée, les contraintes temps réels et les événements non anticipés.

Ainsi, la mise en oeuvre de l'architecture s'effectue sur un groupe de quatre robots mobiles de la compagnie MobileRobots. La flotte de robots est constituée de trois TMPioneer II DX et d'un TMPioneer II AT. Dans le cadre de l'implémentation, le Pioneer AT agit à titre de meneur de train et les DX agissent comme véhicule autonome. La figure 5.1 présente la flotte de véhicule et l'environnement dans lequel l'implémentation s'est effectuée. Le nom de chacun des robots permet de les différencier facilement dans le cadre de l'étude. Le meneur se nomme Jason et les autres véhicules se nomment Lolitta, Anita et Veronica.

Chaque robot est équipé d'un ordinateur de type PC-104 P3 de 1 GHz, 256 Mo de mémoires vives, un disque rigide d'au moins 30 Go et un routeur sans fil. Les routeurs sans fil utilisent le protocole 802.11 version N et possèdent une bande passante de 270 Mbps. Chaque robot possède des encodeurs mesurant le déplacement des roues permettant de réaliser une navigation à l'estimé (*DeadReckoning*).

Pour obtenir l'estimation des distances séparant le véhicule des éléments de l'environnement (c.-à-d. : autres robots, murs et obstacles), le meneur du train est équipé d'un laser TMSICK LMS 200. Quant à eux, les Pioneer DX utilisent une ceinture de 16 sonars pour percevoir les éléments de l'environnement. La diaphonie entre les émetteurs et la réflexion spéculaire à l'intérieur des corridors de l'université peuvent être problématiques, et l'expérience acquise indique qu'il est préférable de considérer uniquement les six sonars orientés vers l'avant du véhicule.

Finalement, l'ensemble de l'architecture est basé sur la capacité pour un véhicule d'estimer la position relative des véhicules à proximité par rapport à son référentiel local. Ces informations peuvent être obtenues à l'aide de système GPS tel que réalisé par Crawford [Crawford, 2005] dans la réalisation de son projet pour AUTO21. Pour cette étude, l'obtention de la position relative des véhicules l'un par rapport à l'autre à l'intérieur des corridors de la Faculté de génie de l'Université de Sherbrooke s'effectue avec le système de positionnement LAMP [Rivard, 2005]. Ce système permet d'obtenir la position relative des véhicules dans un rayon d'action d'un peu plus de 6 mètres. La section 4.1.1 présente les stimuli nécessaires à l'architecture DCD. Le tableau 5.1 indique les capteurs utilisés pour obtenir ces stimuli essentiels à l'architecture.

Tableau 5.1 Mise en correspondance des capteurs avec les stimuli produits

Capteur	Stimuli
Système de navigation à l'estimée (encodeurs de roue)	Attitude du véhicule
LAMP	Position relative des véhicules
Laser et sonars	Estimation des distances séparant le véhicule des éléments de l'environnement

Complétant l'architecture matérielle, un ordinateur portable DELL Inspiron 8600 équipé d'une carte de communication sans fil est utilisé pour contrôler les expérimentations à distance. Cet ordinateur est référencé par le terme ordinateur de contrôle.

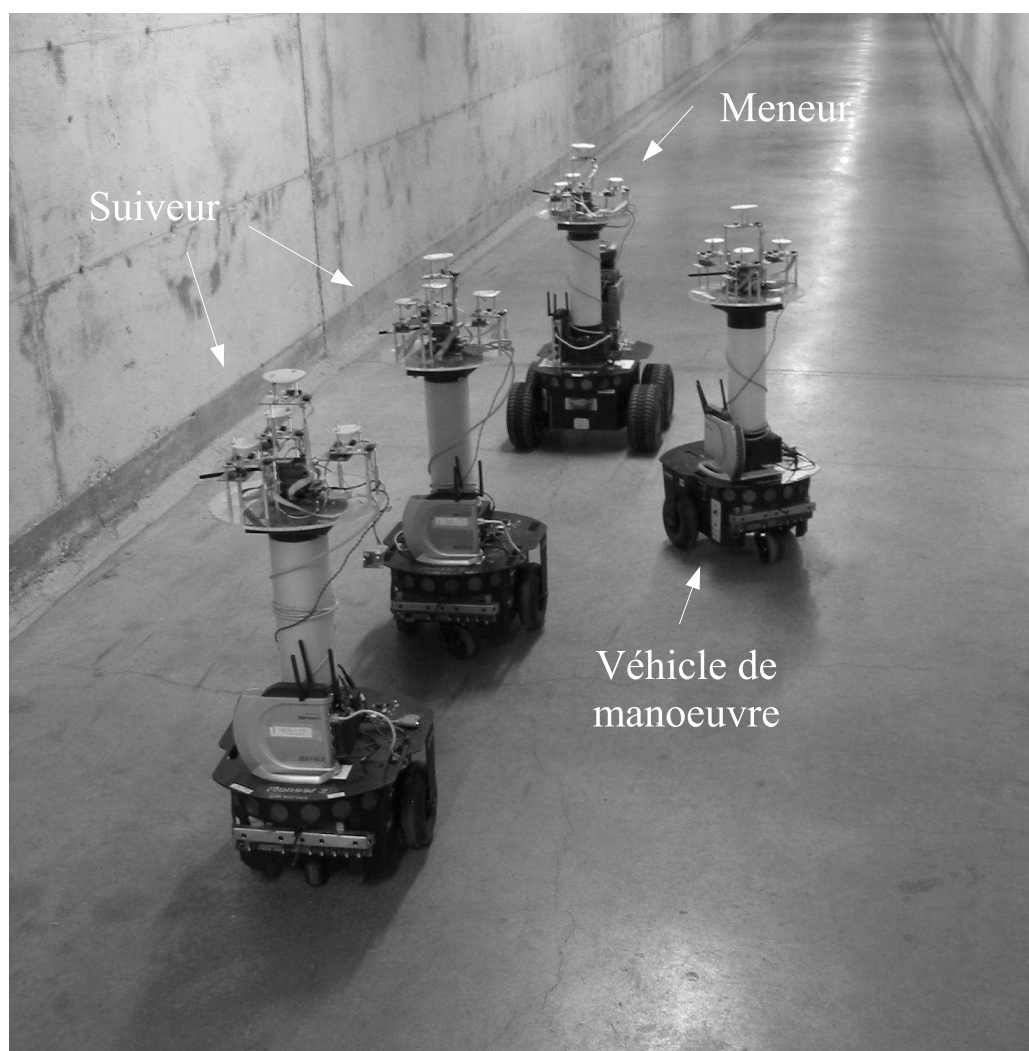


Figure 5.1 Véhicules et environnement de travail

5.2 Architecture logicielle

La mise en oeuvre de l'architecture décisionnelle est basée sur le développement par composant logiciel (*Component-based development*) [Heineman et Councill, 2001]. Cette approche de conception consiste à développer des composants réutilisables permettant leurs assemblages dans différents systèmes. Le choix de cette méthode de conception est justifié par le fait que l'architecture sera réutilisée par les chercheurs partenaires du projet qui ont un ensemble de spécifications propres à leur implémentation.

Pour créer les composants du système, la librairie de prototypage rapide MARIE [Cote *et al.*, 2004] est utilisée. Cette librairie écrite en C++ fournit un ensemble de classes, de protocole et des cadres d'applications (*framework*) permettant de créer des composants logiciels qui pourront rapidement être assemblés et déployés dans d'autres systèmes robotiques. La figure 5.2 illustre l'ensemble des composants logiciels présents sur chacun des véhicules ainsi que les composants présents sur l'ordinateur de contrôle. Les composants sont décrits dans les prochaines sous-sections.

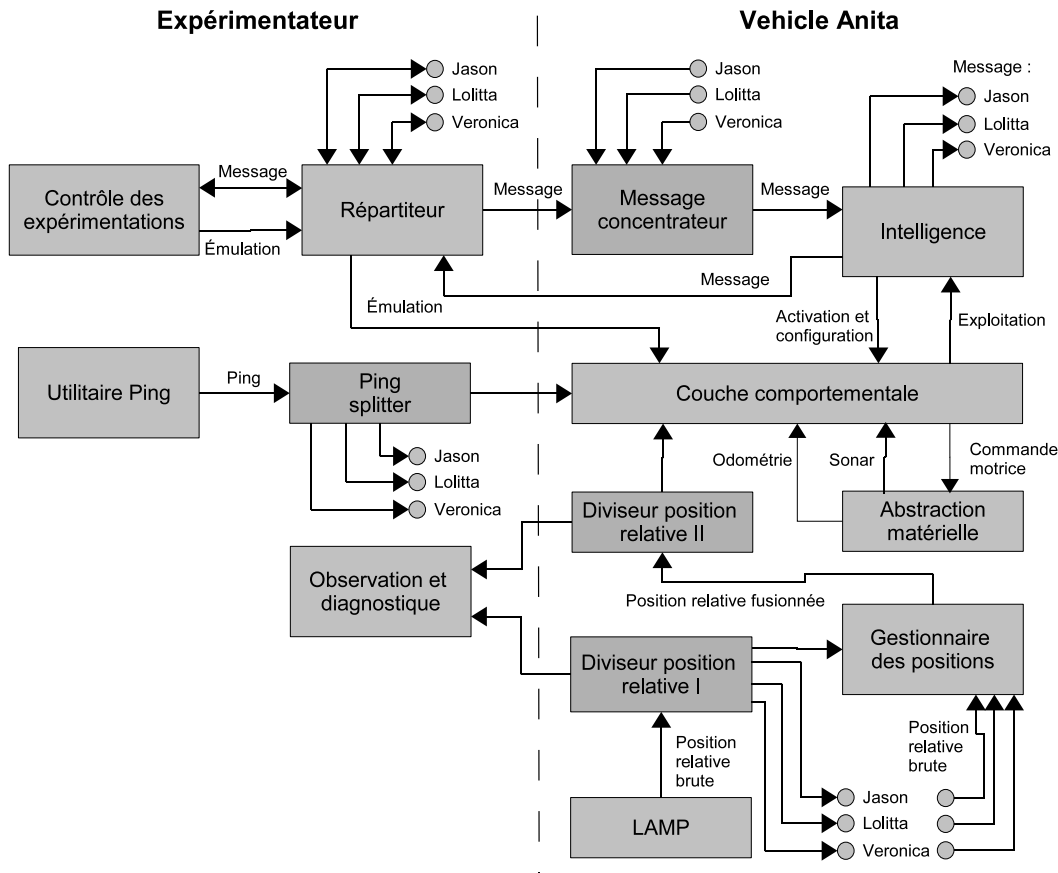


Figure 5.2 Composants logiciels de l'implémentation

5.2.1 Composants déployés sur chaque véhicule

Sur chaque véhicule, un total de huit composants sont déployés : l'intelligence, la couche comportementale, l'abstraction matérielle, le capteur LAMP, le gestionnaire des positions, deux diviseurs et un concentrateur. Ces composants permettent d'implémenter l'architecture décisionnelle DCD illustrée par la figure 4.1.

- *Intelligence* implémente la couche délibérative incluant le modèle et la sélection des comportements. Selon le modèle du véhicule, les messages reçus et la rétroaction comportementale, le composant met à jour le modèle du véhicule, gère l'état du véhicule en stimulant la machine à états finis, et achemine les messages vers les autres véhicules ou vers l'ordinateur de contrôle. De plus, en fonction de l'état de la machine à états finis, le composant produit une commande comportementale en activant et configurant un ensemble de comportements. À l'interne, la machine à états finis est implémentée à l'aide de l'outil *State Machine Compiler* (SMC)⁸. Le composant est complètement asynchrone, mais une fréquence dominante de 10 Hz est induite de la rétroaction venant de la couche comportementale.
- *Couche comportementale* reçoit la commande comportementale du composant *Intelligence* et l'exécute en tenant compte de l'environnement. L'information disponible sur l'environnement est l'attitude du véhicule, les obstacles à proximité et la position relative des véhicules par rapport au capteur LAMP. À l'aide des informations, le composant exécute les comportements nécessaires et produit une commande motrice selon l'arbitrage des comportements. Le composant est conçu de façon générique et chaque comportement est implémenté sous forme de plugiciel. La section 5.2.3 décrit en détails les comportements utilisés dans l'implémentation. Finalement, la couche comportementale est régulée avec une horloge interne fixée à 10 Hz. Cette fréquence est établie par l'expérience acquise au sein du laboratoire avec la couche d'abstraction matérielle utilisée sur les robots.
- *Abstraction matérielle* est un adaptateur d'application MARIE qui enveloppe les fonctionnalités de la librairie Player 1.6.5 [Gerkey *et al.*, 2003]. Player fournit l'attitude du véhicule, les données sonars ou laser selon le cas et applique les commandes motrices reçues sous format : vitesse linéaire (mm/s) et vitesse de rotation (degrés/sec). Player est utilisé en mode bloquant à une fréquence de 10 Hz.
- *LAMP* est un adaptateur d'application MARIE qui enveloppe les fonctionnalités de l'outil FlowDesigner [Létourneau *et al.*, 2005]. Un réseau FlowDesigner gère la

⁸<http://smc.sourceforge.net>

communication sur le port série de l'ordinateur le reliant avec le capteur LAMP. Ce réseau analyse les trames reçues du capteur et fournit une liste brute des positions relatives des véhicules. La fréquence du réseau FlowDesigner est de 10 Hz.

- *Gestionnaire des positions* a pour objectif de palier les faiblesses du capteur LAMP en utilisant les estimations brutes de tous les récepteurs pour déterminer la position relative de chaque véhicule par rapport aux autres. La sous-section 5.3 explicite le rôle de ce composant. Ce composant est asynchrone.
- Les composants restants sont des composants disponibles dans MARIE qui permettent de régler des incompatibilités entre les entrées et sorties de composants connectés ensemble. *Message concentrateur* accepte les messages envoyés par les autres véhicules et par l'ordinateur de contrôle et les achemine vers le composant *Intelligence*. Les deux diviseurs servent à dupliquer l'envoi d'une donnée d'un composant vers N composants. Pour *Diviseur position relative I*, les positions relatives brutes des véhicules obtenues par LAMP sont envoyées aux autres véhicules ainsi qu'au *Gestionnaire des positions*. Pour sa part, *Diviseur position relative II* achemine les positions relatives fusionnées par le *Gestionnaire des positions* à la couche comportementale et au composant *Observation et Diagnostique* déployé sur l'ordinateur de contrôle.

5.2.2 Composants déployés sur l'ordinateur de contrôle

L'ordinateur de contrôle a pour responsabilité de gérer chacune des expérimentations réalisées. À partir de cet ordinateur, l'ensemble des composants est déployé sur chaque véhicule à l'aide du gestionnaire d'application de MARIE. De plus, certains composants sont déployés sur l'ordinateur de contrôle pour s'assurer du bon déroulement de l'expérimentation.

- *Contrôle des expérimentations* est une application développée dans le langage de programmation Java qui exécute un script défini en XML. Les actions possibles dans un script sont : l'envoi d'émulation, l'envoi de message, la réception de message et l'attente pour une durée déterminée. L'émulation permet de simuler des collisions et des défaillances nécessitant un arrêt d'urgence. Ces éléments émulsés sont nécessaires pour les comportements *Simuler une collision* et *Sortir d'urgence* de la couche comportementale. La section 5.2.3 donne plus d'information sur les données émulsées.
- *Répartiteur* est utilisé pour permettre au contrôleur des expérimentations de communiquer avec les véhicules. Ainsi, il achemine les messages et les émulations aux

véhicules concernés. De plus, il reçoit les messages provenant des véhicules et les achemine au contrôleur des expérimentations.

- *Utilitaire Ping*, aidé du *diviseur* associé, envoie périodiquement un message vide à la couche comportementale de chaque véhicule. Ce message permet de réinitialiser l'horloge interne du comportement *Détecter le réseau* qui s'assure de la connectivité réseau durant toute la durée d'une expérimentation (voir section 5.2.3).
- *Observation et diagnostique* a pour objectif d'afficher sur l'ordinateur de contrôle l'état des systèmes LAMP. Ces informations permettent de rapidement détecter les cas où les capteurs LAMP ne sont pas initialisés correctement.

5.2.3 Comportements déployés dans l'implémentation

La couche comportementale décrite à la section 4.1.2 présente les comportements nécessaires pour exécuter les manœuvres sélectionnés selon le paradigme des architectures comportementales. Cette section présente la mise en oeuvre de la couche comportementale afin de l'adapter aux véhicules, aux capteurs et à l'environnement utilisés concrètement dans le projet.

Les principaux éléments à considérer dans l'implémentation sont le remplacement des conducteurs humains, la simulation des collisions et des défaillances, la détection des défaillances du réseau sans fil et la désactivation de l'évitement d'obstacles. Les figures 5.3 et 5.4 présentent les comportements utilisés dans l'implémentation de l'architecture selon si l'architecture est implémentée sur le meneur du train ou sur un véhicule membre. Les stimuli en italiques représentent les variables de configuration provenant de la couche délibérative, ceux en gras sont des variables émulés par l'ordinateur de contrôle, et les autres sont les données extraites des capteurs.

Remplacement des conducteurs humains

La plus importante considération pratique sur l'implémentation de l'architecture concerne le fait qu'aucun conducteur humain ne conduit les véhicules. Dans l'approche des trains de véhicules d'AUTO21, le véhicule à la tête du train est normalement conduit par un conducteur certifié. De plus, avant d'activer le pilote automatique, chaque véhicule est également conduit par un humain. Dans le présent projet, la conduite manuelle normalement assuré par les conducteurs humains est substituée par des comportements autonomes. Concrètement, cette considération amène l'ajout de deux comportements et une implémentation particulière du comportement *Rechercher un train de véhicules*.

Le premier comportement ajouté est *Mener le train*. Ce comportement, exclusivement utilisé sur le Pioneer AT, utilise les données *laser* pour assurer une conduite autonome du meneur du train de véhicules. L'approche utilisée consiste à implémenter un comportement de suivi de corridor à l'intérieur duquel le véhicule conserve un *ratio* de référence entre les murs de l'environnement tout en conservant une vitesse de déplacement constante (*vitesseLin*). Un ratio de 0.5 indique au véhicule de rester au centre du corridor. Le ratio et la vitesse de déplacement sont extraits de la commande comportementale. Ainsi, le véhicule se dirige toujours en ligne droite comme s'il était sur un long segment d'autoroute.

Le deuxième comportement ajouté est *Parcourir distance*. Ce comportement permet au meneur du train de s'immobiliser une fois que le véhicule a parcouru une certaine distance. Le comportement est utilisé lorsqu'une collision ou une situation d'urgence surviennent dans le train de véhicules. Étant responsable du train, le véhicule de tête doit s'immobiliser afin de porter assistance aux passagers des différents véhicules du train. En parcourant une certaine distance avant de s'immobiliser, l'espace nécessaire aux manœuvres d'urgence réalisées par les véhicules membres du train est ainsi disponible. Le stimulus *Attitude* est utilisé pour déterminer la distance parcourue par le véhicule depuis l'activation du comportement. La distance à parcourir avant de s'immobiliser est fixée à 5 m. Ce comportement est exclusivement utilisé sur le meneur du train de véhicules.

Pour sa part, le comportement *Rechercher un train de véhicule* est implémenté de manière à automatiser le déplacement des véhicules lorsqu'ils sont en conduite autonome. À l'instar du comportement *Mener le train*, un algorithme de suivi de corridor est utilisé. Puisque ce comportement est utilisé uniquement sur les véhicules Pioneer DX, les *sonars* sont utilisés pour détecter les corridors. La position relative des véhicules (*posRelative*) est injectée en entrée du comportement pour identifier un meneur potentiel.

Simulation des collisions et des défaillances

Le comportement *Détecter une collision* a pour objectif d'analyser le déplacement du véhicule pour détecter un impact entre le véhicule et un élément de l'environnement (c.-à-d. : véhicule, animal, sortie de route, etc.). Dans le cadre du projet, afin de préserver le matériel, la possibilité d'effectuer de réelles collisions avec les véhicules a été écartée. Conséquemment, le comportement est substitué par le comportement *Simuler une collision*. La variable booléenne *simulerCollision* injectée en entrée permet d'émuler qu'un impact est survenu. Quand l'ordinateur de contrôle active cette variable, le comportement est exploité et la trajectoire du véhicule est modifiée drastiquement afin de simuler la ré-

action à un impact virtuel. L'établissement de cette trajectoire s'effectue en considérant l'*attitude* courante du véhicule.

Dans le même ordre d'idée, la variable booléenne *simulerDéfaillance*, activée par l'ordinateur de contrôle, est injectée à l'entrée du comportement *Sortir d'urgence* afin d'émuler la condition justifiant une sortie d'urgence. Cette condition émule le mauvais fonctionnement du système de positionnement relatif. L'utilisation de cette variable émulée permet de simuler des pannes du système de positionnement même si ce dernier est en parfait état de marche. Ces deux variables booléennes sont des stimuli supplémentaires ajoutés à la couche comportementale théorique. En ce qui concerne le comportement *Sortir d'urgence*, la position relative des véhicules dans l'environnement (*posRelative*), ainsi qu'une liste de véhicules (*listeVehicles*) sont injectées en entrée du comportement. Cette liste de véhicules est fournie par la couche délibérative, et représente les véhicules dont la position relative doit être connue pour assurer le bon fonctionnement du train. Si la position de l'un de ces véhicules n'est pas fournie par le système de positionnement, le comportement est exploité et une sortie d'urgence a lieu.

Défaillance du réseau sans fil

La technologie sans fil n'est pas infaillible et des pertes de connectivités sont susceptibles de survenir à tout moment. Pour des véhicules automobiles circulant à 100 km/h sur une infrastructure routière, la perte de connectivité réseau avec les véhicules à proximité peut avoir des conséquences fâcheuses. Une architecture décisionnelle déployée sur des véhicules automobiles doit impérativement réagir de façon cohérente et intelligente aux différentes défaillances susceptibles de survenir avec cette technologie de communication sans fil.

Considérant que d'autres groupes de recherche d'AUTO21 et d'ailleurs étudient cette question et afin de restreindre la portée de ce travail, la gestion des défaillances réseau n'est pas considérée dans l'architecture. Cependant, pour considérer une expérimentation valide, aucune perte de communication ne doit survenir. Ainsi, le comportement *Détecter le réseau* est ajouté à la couche comportementale de tous les véhicules. Le rôle de ce comportement est d'immobiliser le véhicule si la communication avec l'ordinateur de contrôle est interrompue. L'utilitaire Ping, déployé sur l'ordinateur de contrôle, envoie un message vide à interval régulier (*ping*). Si le message n'est pas reçu dans le délai attendu, le comportement est exploité et le véhicule est immobilisé.

Désactivation de l'évitement d'obstacle

La réflexion spéculaire des ondes sonores dans l'environnement de tests est très importante. Puisque les sonars des différents robots ne sont pas synchronisés entre eux, il est possible

que le signal émis par un véhicule soit reçu par le récepteur d'un autre véhicule. Ces fausses détections amènent le comportement d'évitement d'obstacle à éviter des obstacles qui n'existent pas. Ces fausses détections d'obstacle étaient systématiques et les véhicules n'étaient pas en mesure de suivre leur meneur adéquatement. Ainsi, le comportement a été éliminé sur les Pioneer DX afin de permettre la validation des autres éléments de l'architecture. Puisque le meneur du train est équipé d'un laser, le comportement d'évitement d'obstacle a été conservé.

5.2.4 Arbitration et sélection des comportements

L'ajout de comportements modifie la hiérarchie des comportements et leur sélection selon l'état du système. Les changements sont différents pour le meneur du train et pour les autres véhicules. La figure 5.3 présente l'arbitration des comportements avec l'ensemble des stimulis pour le meneur du train. En complément, le tableau 5.2 présente les comportements activés selon l'état du système pour le meneur. Finalement, la figure 5.4 et le tableau 5.3 présentent les mêmes informations pour les autres véhicules.

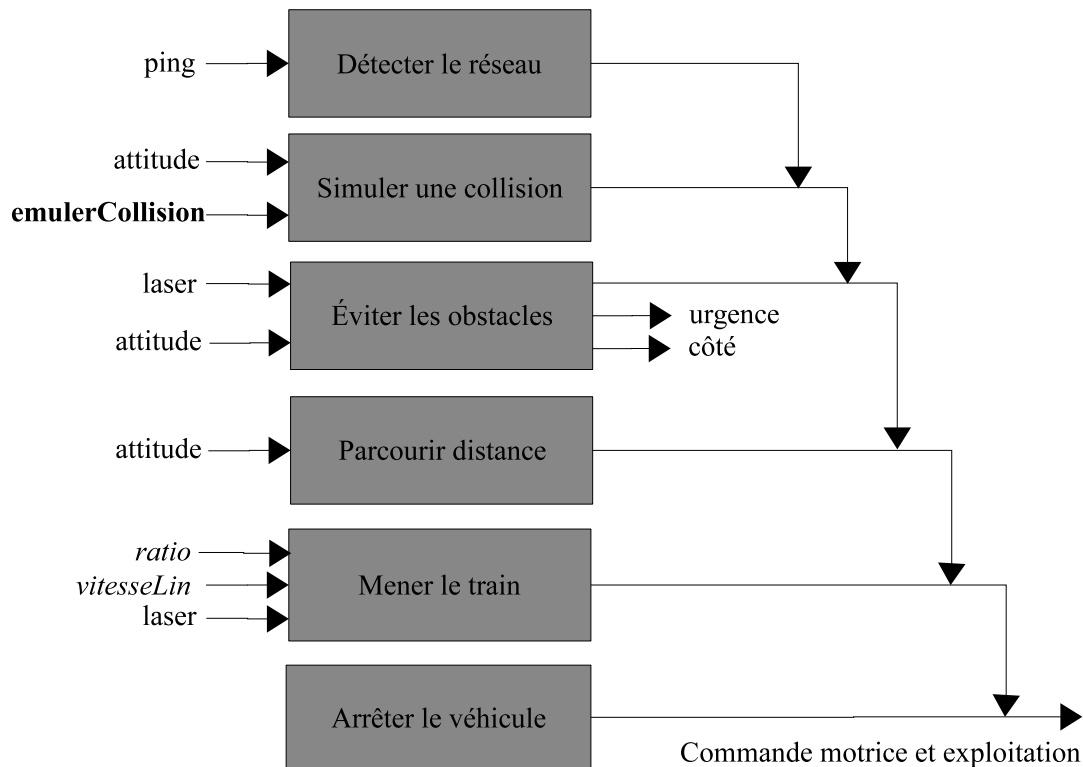


Figure 5.3 Arbitration des comportements pour le meneur du train

Tableau 5.2 Activation des comportements selon l'état du système pour le meneur du train

		Comportements					
		Détecter le réseau	Simuler une collision	Éviter les obstacles	Parcourir distance	Mener le train	Arrêter le véhicule
États	Meneur	X	X	X		X	X
	Agent libre	Non applicable					
	Approche	Non applicable					
	Insertion	Non applicable					
	Membre	Non applicable					
	Retrait	Non applicable					
	Collaboration insertion	X	X	X		X	X
	Collaboration retrait	X	X	X		X	X
	Arrêt	X					X
	Arrêt d'urgence	X	X				X
	Manœuvre d'urgence	X	X	X	X	X	X
	Sortie d'urgence	Non applicable					

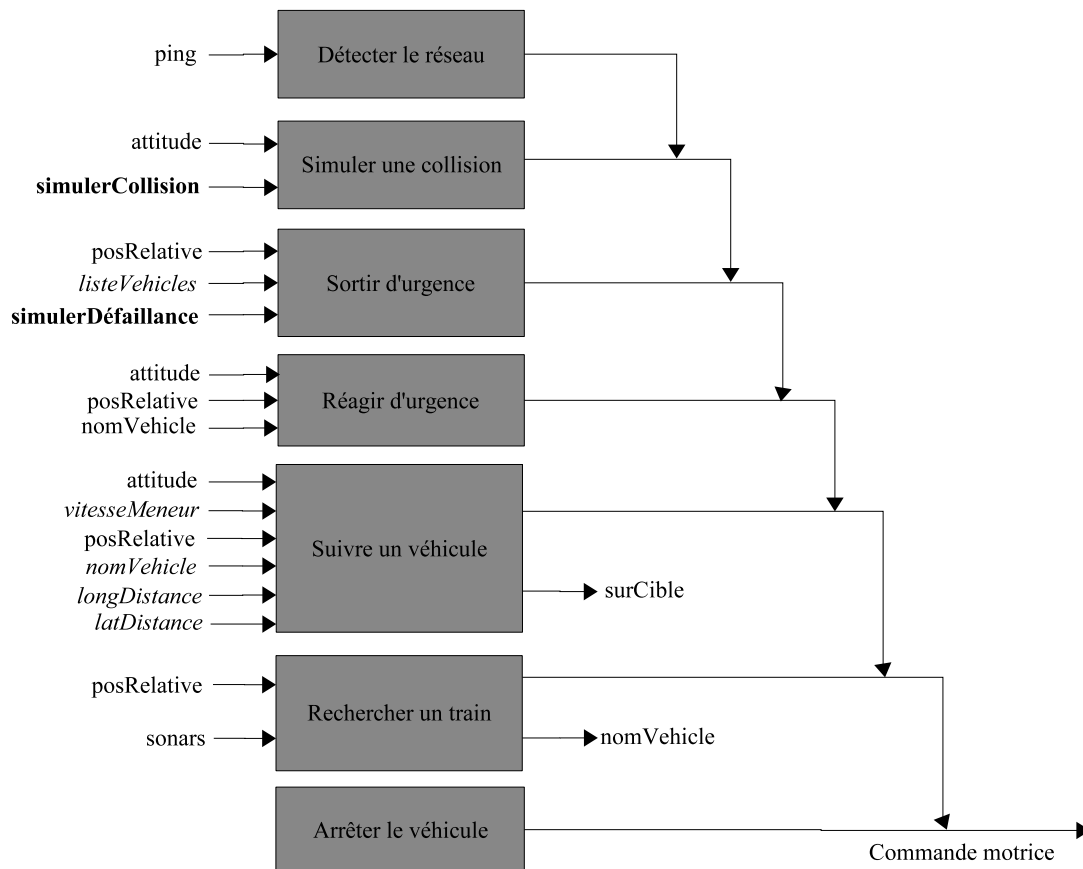


Figure 5.4 Arbitration des comportements pour les véhicules autonomes

Tableau 5.3 Activation des comportements selon l'état du système pour les véhicules autonomes

		Comportements						
		Détecter le réseau	Simuler une collision	Sortir d'urgence	Réagir d'urgence	Suivre un véhicule	Rechercher un train	Arrêter le véhicule
États	Meneur	Non applicable						
	Agent libre	X	X				X	X
	Approche	X	X	X		X		X
	Insertion	X	X	X		X		X
	Membre	X	X	X		X		X
	Retrait	X	X	X		X		X
	Collaboration insertion	X	X	X		X		X
	Collaboration retrait	X	X	X		X		X
	Arrêt	X						X
	Arrêt d'urgence	X	X					X
	Manœuvre d'urgence	X	X	X	X	X		X
	Sortie d'urgence	X	X	X				X

5.3 Performance du système LAMP

Le capteur LAMP [Rivard, 2005] est un capteur prototype développé à l'Université de Sherbrooke. L'utilisation faite dans ce projet est exactement le genre d'application visée par ce capteur. Cependant, son utilisation dans les corridors réunissant la Faculté de génie et la Faculté d'administration de l'Université de Sherbrooke a permis d'identifier des faiblesses et des limitations dans l'utilisation du capteur. Ces faiblesses sont : l'obstruction de la ligne de vue et les trajets multiples. Sans traitements supplémentaires, elles rendent inutilisables le capteur LAMP pour le projet. Considérant la nature prototype du capteur, des ajustements ont été réalisés pour l'utiliser et mener le projet DCD à terme.

La principale faiblesse est due à la réalité physique du capteur qui amène des erreurs de positionnement quand la ligne de vue entre un émetteur et un récepteur ultrasonique est obstruée par un obstacle ou un autre véhicule. Quand les véhicules se suivent les uns derrière les autres, les obstructions sont fréquentes et la performance du capteur diminue rapidement. Lorsque ces obstructions surviennent, certains véhicules sont mal positionnés ou disparaissent complètement. Selon l'expérimentation réalisée, ces erreurs de positionnement s'avèrent critiques et peuvent causer l'échec de l'expérimentation.

Pour palier aux faiblesses du capteur, le composant *Gestionnaire des positions* utilise l'ensemble des données brutes des différents capteurs LAMP pour combiner les estimations afin de prévenir les fausses détections. Concrètement, le capteur LAMP d'Anita fournit une estimation brute de la position de Jason, de Lolitta et de Véronica. En plus de cette estimation, le gestionnaire reçoit également les estimations provenant du capteur de Jason, de Lolitta et de Véronica. Cette redondance dans les estimations permet au gestionnaire d'éviter des cas problématiques comme la téléportation et la disparition des véhicules dans l'environnement. Sans ce gestionnaire, le système LAMP de chaque véhicule est incapable de positionner correctement les véhicules pour la durée des expérimentations.

Le système LAMP, combiné avec le gestionnaire des positions, forme le capteur principal sur lequel les comportements se fient pour réaliser les différentes manœuvres supportées par l'architecture. Utilisant la redondance dans l'estimation des positions de chaque capteur, le gestionnaire des positions est en mesure de palier aux principales faiblesses du capteur. Ainsi le capteur peut être utilisé dans l'architecture.

Malgré l'implémentation de ce gestionnaire des positions, les performances obtenues ne sont pas exceptionnelles et rendent le système instable. Afin de caractériser les capteurs et permettre l'analyse des performances du système, les systèmes LAMP d'Anita, de Veronica et de Lolitta ont été évalués. Aucune donnée n'est présentée pour le système de

Jason puisque le meneur du train n'a pas besoin de connaître la position des véhicules qui le suivent. Le test de caractérisation consiste à effectuer la collecte des estimations pour les trois véhicules placés l'un derrière l'autre. L'estimation de position considérée est celle du véhicule avec son meneur immédiat. L'ordre des véhicules est la suivante : Jason, Anita, Veronica et Lolitta. Précisons que les robots sont immobiles tout au long de la prise de données qui s'est échelonnée sur 10 minutes.

Les courbes de la figure 5.5 illustrent bien que l'erreur selon les deux axes est centrée autour d'une moyenne et que la distribution est sensiblement similaire au-dessus et au-dessous de la moyenne. L'oscillation autour de cette moyenne dépend du système et de l'axe considéré. Le tableau 5.4 présente les statistiques pertinentes qui confirment ces observations. L'estimation de la distance longitudinale est beaucoup plus précise que l'estimation selon l'axe latéral. Pour les systèmes les moins précis, les coefficients de variations selon l'axe longitudinal et l'axe latéral sont respectivement de 9.1 % et de 136.4%. Ces chiffres indiquent que le capteur fournit une meilleure estimation selon l'axe longitudinal que l'axe latéral.

Considérant une loi normale et la surface de ± 3 écarts-types, il est juste de considérer que 99 % des estimations pour les systèmes équipant Veronica et Lolitta se situent à l'intérieur d'une plage de 270 mm centrée sur la moyenne. Cette plage représente environ 70 % de la largeur des véhicules. Le maximum et le minimum obtenus durant la collecte de données indiquent clairement que des erreurs d'estimation de cette amplitude se produisent. Ceci impacte le comportement de suivi de véhicules, car il doit considérer l'amplitude des erreurs d'estimation afin de déterminer s'il est correctement aligné avec son meneur. Des seuils de tolérance ont été utilisés, ce qui se traduit nécessairement par une erreur en régime permanent du comportement.

De plus, précisons que le référentiel utilisé par le système LAMP pour estimer la position des autres véhicules est local. Ainsi, il est sensible à l'orientation du véhicule. Il est probable que les véhicules ne partagent pas la même orientation et se dirige momentanément dans des directions différentes, ce qui induit des erreurs dans l'estimation. Considérant la variance dans l'estimation des positions et le fait que l'orientation des véhicules n'est jamais identique, la qualité des estimations lorsque les véhicules sont en mouvement est nécessairement plus faible que lorsqu'ils sont stationnaires. L'impact de la différence d'orientation entre les véhicules sur l'estimation de la position n'a pas été mesuré puisqu'aucune mesure précise de l'orientation des véhicules n'est disponible. La seule estimation disponible est celle obtenue par l'algorithme de navigation à l'estimé des véhicules, qui n'est pas précise sur les robots Pioneer.

Finalement, une faiblesse supplémentaire du système LAMP est présentée sur la courbe des estimations en position selon l'axe longitudinal de Veronica sur la figure 5.5 présente une valeur très erronée au alentour de la 470ième secondes. Cette mauvaise estimation est attribuable au capteur LAMP qui reçoit les signaux sonores selon des trajets multiples. Ce type d'erreur survient à l'occasion surtout quand le meneur est loin ou que des véhicules obstruent partiellement la vue entre le véhicule et son meneur. Plusieurs expérimentations ont échoué à cause de cette faiblesse. Aucune solution n'a été trouvée pour en réduire l'impact.

Tableau 5.4 Performance du système LAMP

Axe	Statistique	Anita	Veronica	Lolitta
Longitudinal	Min (mm)	-53	-280	78
	Max (mm)	-37	-53	99
	Moyenne (mm)	-41	-99	90
	Écart type (mm)	2	9	3
	CV (%)	2.4	9.1	3.3
Latéral	Minimum (mm)	-171	-66	-103
	Maximum (mm)	28	211	162
	Moyenne (mm)	-66	71	33
	Écart type (mm)	20	45	45
	CV (%)	30.3	63.3	136.4

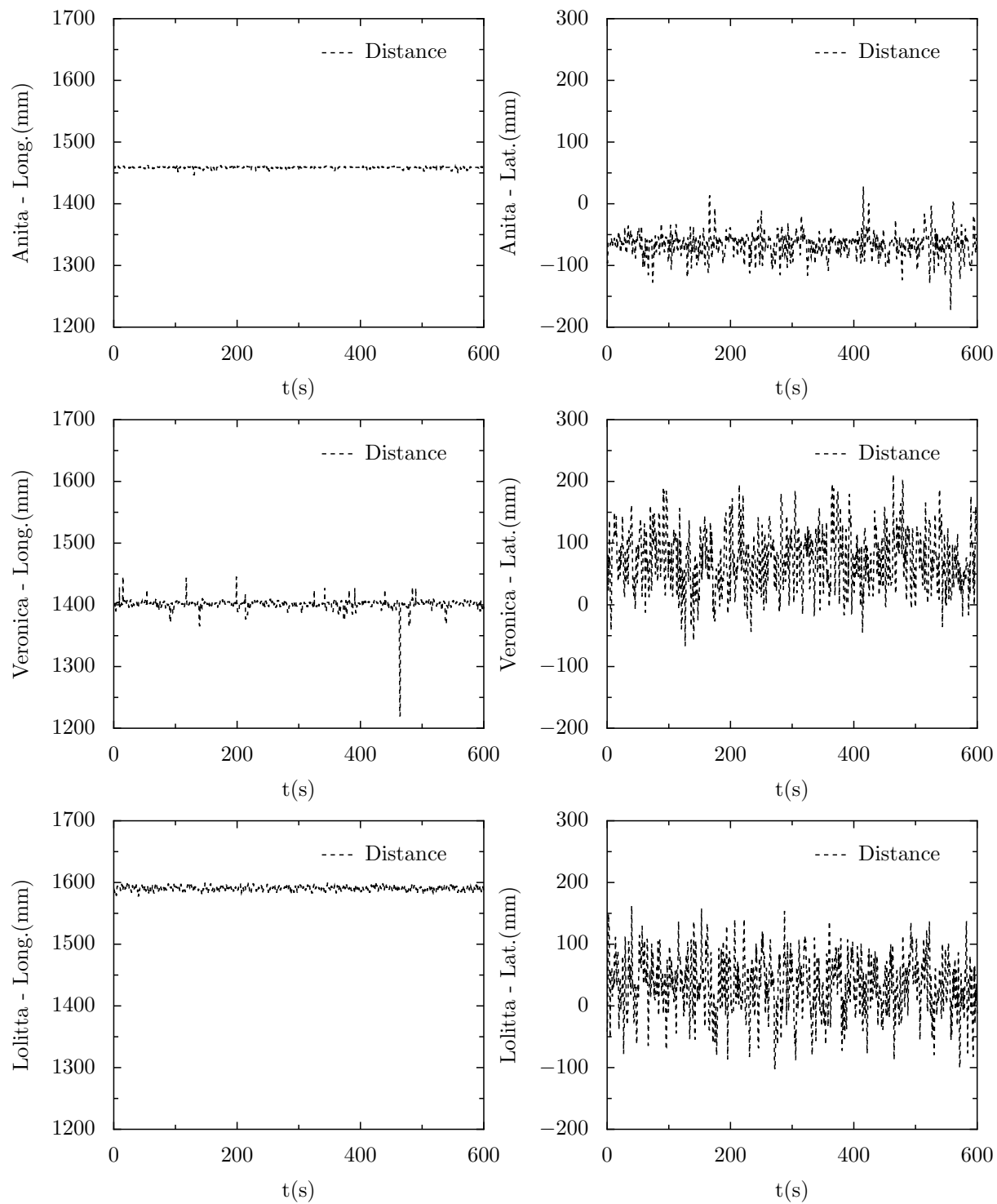


Figure 5.5 Performance du système LAMP

CHAPITRE 6

TESTS ET RÉSULTATS

L'architecture DCD vise à réaliser l'ensemble des manœuvres d'écrites au tableau 4.1 de façon sécuritaire et coordonnée avec l'ensemble des véhicules à proximité. Afin de valider les fonctionnalités de l'architecture, l'ensemble des manœuvres supportées doit être validé à l'aide de tests rigoureux. Ainsi, un ensemble de 18 tests a été réalisé à l'aide de quatre robots mobiles dans le tunnel reliant la Faculté de génie et la Faculté d'administration de l'Université de Sherbrooke. Chaque test présente un cas d'utilisation susceptible de survenir dans un train de véhicules. En plus de vérifier les cas d'utilisations normales du train, un accent particulier a été porté sur les situations d'urgences telles la détection d'une collision et les sorties d'urgences.

La présentation des résultats est organisée en regroupant les tests en trois catégories distinctes : opération normale, opération lors d'une collision et opération lors d'une sortie d'urgence. Mentionnons que chaque test valide minimalement les manœuvres suivantes : maintenir la vitesse, mener le train et respecter la stratégie d'espacement. Ces manœuvres de bases sont réalisées dès qu'un train est en mouvement. Préalablement à la présentation des tests, un ensemble de généralités sur les expérimentations est présenté.

Pour chacun des tests, un ensemble de métriques a été collecté en temps réel afin de permettre une analyse complète des mécanismes de prise de décision, de la communication entre les véhicules, de l'évolution du modèle des véhicules et des comportements. Les informations les plus importantes pour valider la prise de décision et l'échange des informations au sein de l'architecture sont les variations dans le modèle des véhicules et les messages échangés entre les véhicules. Le modèle des véhicules permet de voir les changements dans le meneur, le suiveur, le véhicule de manœuvre avec lesquels un véhicule collabore. Il est également possible de voir les transitions d'états et les comportements exploités par les véhicules en tout temps. Ces informations sont importantes pour valider que la machine à états de la couche délibérative est sensible aux bons stimuli et traite de façon convenable les événements. Quant à eux, les messages échangés par les véhicules au cours de l'expérimentation permettent de valider l'établissement des collaborations entre les véhicules et le respect de la règle stipulant qu'une seule manœuvre d'insertion ou de retrait peut être exécutée à la fois. Ainsi, la quasi-totalité des tests présente deux tableaux pour représenter ces informations. Le tableau présentant les messages échangés entre les véhicules utilise

la convention suivante : un message émis par un véhicule est inscrit en caractère régulier, alors qu'un message reçu par un véhicule est inscrit en caractère italique.

De plus, dans le cas où la configuration du train change beaucoup durant un test, un graphique présentant l'évolution de la configuration au cours de l'expérimentation est présentée. Dans ce graphique, le carré plein représente le meneur du train Jason, le carré vide représente Lolitta, le double carré vide représente Anita et le double carré plein représente Véronica. Spécifions que les graphiques illustrent une approximation des positions relatives des véhicules.

Pour garantir la répétabilité de la prise de décision, chaque scénario de test a été réalisé jusqu'à l'obtention de 10 essais réussis. Certains scénarios ont requis 16 essais pour obtenir les 10 requis. Les causes des échecs sont dues au système LAMP, aux sonars et au système de navigation à l'estimé. La présentation des scénarios de tests élabore sur ces échecs.

6.1 Opération normale

Ce regroupement de tests représente les conditions normales d'opérations le plus fréquemment rencontrées dans les trains de véhicules. Quatre tests sont présentés : arrêt et départ, changement de voie et insertion et retrait des véhicules dans le train.

6.1.1 Arrêt et départ

L'objectif de ce test est de déterminer les performances des manœuvres de bases (c.-à-d. : maintenir la vitesse, mener le train et respecter la stratégie d'espacement). Au début du test, les quatre véhicules sont alignés l'un derrière l'autre avec un espacement d'environ 1,5 m entre chaque véhicule. Cette configuration du train correspond à la configuration en régime permanent, c'est-à-dire que les véhicules suivent un meneur et font partie du train de véhicules. Aucun changement n'a lieu sur la configuration du train pendant l'expérimentation. Ainsi, les machines à états finis des véhicules membres débutent à l'état *Arrêt*, transitent à l'état *Membre* pour revenir à l'état *Arrêt* à la fin du test. Pour sa part, le meneur effectue le même séquençement de transition à l'exception qui transite à l'état *Meneur* au lieu de l'état *Membre*.

Tout le long du test, le meneur du train circule en ligne droite à une distance de 1,35 m du mur de gauche. Il varie sa vitesse de déplacement selon une fonction périodique définie sur 90 secondes. La figure 6.2 illustre les variations de vitesse du meneur Jason, ainsi que la réaction des autres véhicules. L'échantillonnage des mesures est de 1 Hz. L'objectif pour-

suivi est de tester le comportement de suivi de véhicule qui est le comportement exploité par tous les véhicules à l'exception du meneur. Les changements de vitesse simulent des accélérations et des décélérations semblables à celles observées lors de la conduite sur une infrastructure routière congestionnée.

À chaque changement de vitesse, le meneur communique sa nouvelle vitesse à son suiveur immédiat. À tour de rôle, chaque véhicule relaie l'information à son suiveur. Ainsi, la nouvelle vitesse de croisière du train se propage vers l'arrière du train et tous les véhicules reçoivent l'information. Le tableau 6.1 illustre cette dynamique pour le premier changement de vitesse.

Tableau 6.1 Messages échangés dans le test d'arrêt et départ.

T(s)	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.08	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
1.00	Changement de vitesse	<i>Changement de vitesse</i>		
1.10		Changement de vitesse	<i>Changement de vitesse</i>	
1.18			Changement de vitesse	<i>Changement de vitesse</i>

Tout au long du test, les véhicules tentent de conserver une distance de 1,5 m avec leur meneur. La figure 6.1 illustre la distance relative de chaque véhicule par rapport à son meneur selon les axes longitudinaux et latéraux. Complémentant la figure, le tableau 6.2 synthétise les statistiques pertinentes sur le comportement de suivi de véhicule pour l'ensemble des dix essais réalisés pour ce test.

Tableau 6.2 Erreurs du suivi de véhicule en ligne droite

Axe	Statistique	Anita	Veronica	Lolitta
Longitudinal	Min (mm)	-245	-253	-252
	Max (mm)	214	237	241
	Moyenne (mm)	13	-23	-23
	Écart-type (mm)	48	69	101
	CV (%)	369	300	439
Latéral	Minimum (mm)	-280	-467	-261
	Maximum (mm)	279	365	295
	Moyenne (mm)	-8	18	11
	Écart-type (mm)	67	104	67
	CV (%)	837	577	609

Les statistiques indiquent clairement que le comportement de suivi de véhicule est en mesure de conserver la distance souhaitée avec le meneur, et ce peu importe la vitesse de

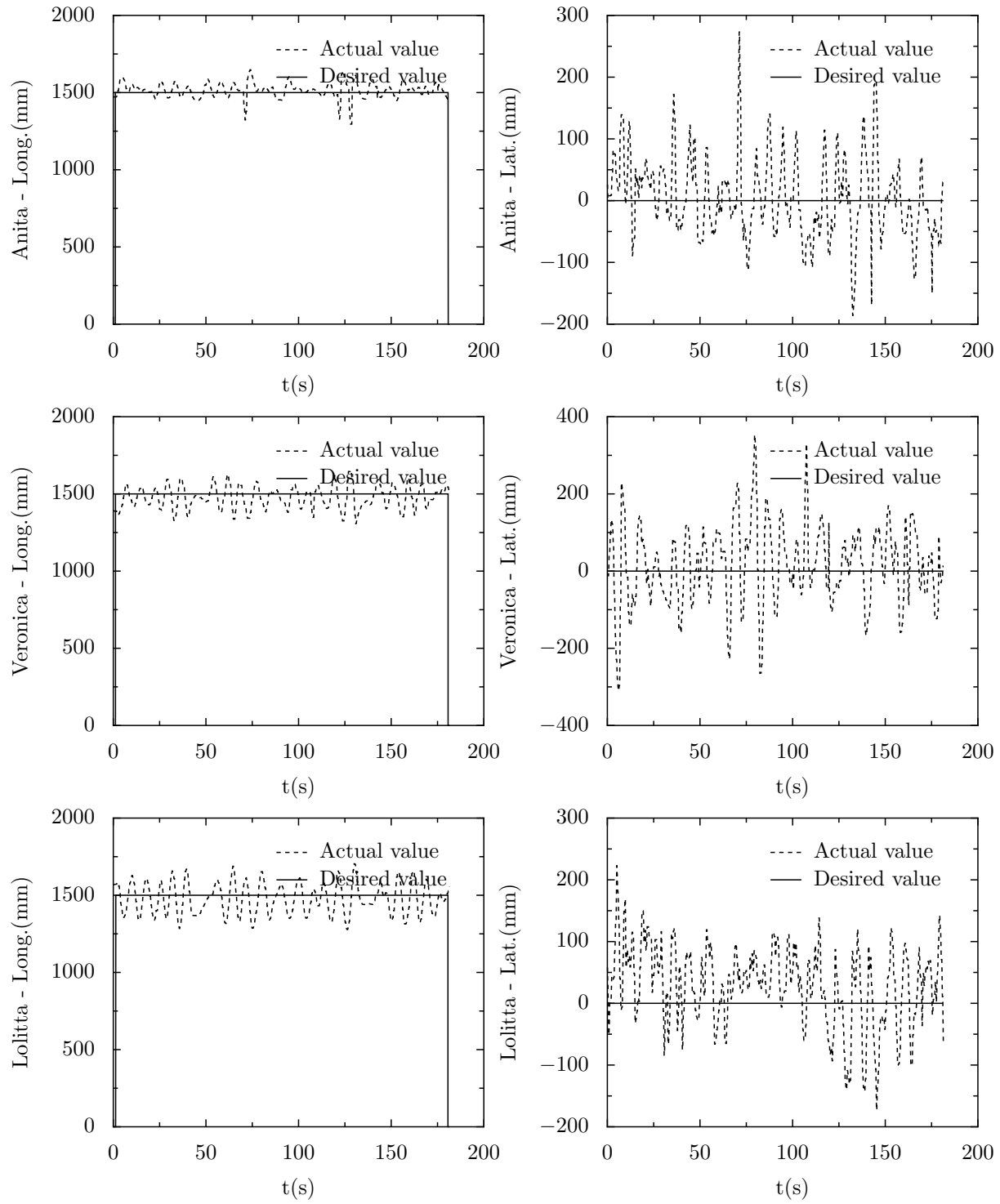


Figure 6.1 Distance de suivi entre les véhicules

déplacement du meneur du train. La plus grande moyenne de l'erreur en position selon l'axe longitudinale est de -23 mm, ce qui est faible relativement à la distance désirée de 1500 mm. Cependant, les écarts-types indiquent que le suivi selon l'axe longitudinal s'effectue avec beaucoup d'oscillation. En comparaison avec les écarts-types présentés à la section 5.3 où les véhicules étaient stationnaires, ceux obtenus en déplacement sont beaucoup plus importants. En effet, l'écart-type est 24 fois plus grands pour Anita, 8 fois plus grand pour Veronica et 34 fois plus grand pour Lolitta. Une analyse similaire est réalisée en considérant l'estimation de la position selon l'axe latéral des véhicules. La plus grande moyenne de l'erreur en position est de 18 mm, ce qui est peu par rapport à la largeur des véhicules qui est de 380 mm. Les écarts-types sont également plus importants que lorsque les véhicules étaient stationnaires, mais moins importants que selon l'axe longitudinal. Puisque les véhicules ont pour consigne de se suivre l'un derrière l'autre et que les véhicules sont initialement alignés l'un derrière l'autre, ces statistiques indiquent que le comportement de suivi de véhicule est en mesure de suivre le véhicule qui le précède avec une précision suffisante pour valider la prise de décision de l'architecture.

Pour élaborer sur les oscillations observées lors de ces tests, il faut expliquer qu'elles sont attribuables à deux facteurs principaux. Le premier est le système LAMP qui estime la position des véhicules selon un référentiel local à chaque véhicule. L'orientation des véhicules influence donc l'estimation de la position. Pour obtenir une estimation de la position permettant aux véhicules du train de circuler dans la même direction avec précision, chaque véhicule devrait connaître l'orientation du véhicule qui le précède et effectuer la correction avec sa propre orientation. Une erreur est induite dans l'estimation si les véhicules ne partagent pas la même orientation, ce qui se produit quand les véhicules sont en déplacement. Ne possédant pas d'estimation précise de l'orientation des véhicules, aucune solution ne peut être avancée pour améliorer la précision du système LAMP appliqué dans le concept de l'architecture DCD. Le deuxième facteur influençant la qualité du suivi de véhicules est dû à l'ajustement des gains du contrôleur implémenté dans le comportement de suivi de véhicule. L'ajustement du comportement a été réalisé de façon empirique afin de ne pas être trop sensible aux oscillations dans l'estimation de la position avec le meneur. Cet ajustement se traduit par le choix de petits gains qui ralentit la réponse du comportement et qui admet une erreur en régime permanent. La courbe de Lolitta selon l'axe latéral illustré par la figure 6.1 présente une telle erreur en régime permanent. En effet, le véhicule est globalement à droite de son meneur et une erreur moyenne d'environ 60 mm est présente sur les 100 premières secondes. Cette erreur est perceptible sur les vidéos des expérimentations et se produit dans la plupart des expérimentations.

Une observation supplémentaire à formuler sur les oscillations concerne l'augmentation de leur amplitude selon la position du véhicule dans le train. Les écarts-types selon l'axe longitudinal passent de 48 pour Anita ($CV = 369\%$), à 69 pour Veronica ($CV = 300\%$) et à 101 pour Lolitta ($CV = 439\%$). Puisque les valeurs minimum et maximum ainsi que les moyennes sont comparables, la différence dans les écarts-types indique que les erreurs de position d'un véhicule en aval influencent celles des véhicules en amont. Ainsi, le comportement de suivi de véhicule sur Lolitta modifie plus fréquemment et avec une plus grande amplitude la commande de vitesse transmise au robot. La figure 6.2 illustre ce fait en présentant la vitesse linéaire des véhicules au court d'une expérimentation. Plus le véhicule est loin dans le train de véhicules, plus la vitesse de déplacement fluctue.

Cette observation indique que le contrôleur utilisé ne satisfait pas le critère de la stabilité de maille décrit par Rajamani et Shladover [Rajamani et Shladover, 1999]. Selon l'étude de Yanakiev et Kanellakopoulos [Yanakiev et Kanellakopoulos, 1996], ce critère pourrait théoriquement être satisfait puisque la vitesse désirée du meneur du train est connue de tous les véhicules. Les estimations oscillantes du système LAMP amènent beaucoup de perturbation à l'entrée des contrôleurs longitudinal et latéral du véhicule, rendant le train instable.

6.1.2 Changement de voie

La réalisation d'un changement de voie dans l'architecture DCD ne s'effectue pas de façon spécifique. C'est-à-dire qu'aucun message ou état dédié n'est utilisé pour réaliser un changement de voie. Lorsque le meneur du train effectue un changement de voie, les véhicules continuent à suivre leur meneur respectif, ce qui induit forcément un changement de voie de l'ensemble du train. Cette manœuvre représente un grand défi pour le comportement de suivi de véhicule et le système de positionnement relatif. Ce test complète le précédant dans l'établissement des performances dynamiques du comportement de suivi de véhicules, qui est le comportement le plus fréquemment exploité dans l'ensemble des tests. Ce test évalue son comportement en virage, alors que le précédant l'évaluait en ligne droite.

Le test réalisé consiste à modifier le ratio de référence du comportement de suivi de mur exploité sur le meneur du train. La variation de ce ratio induit des déplacements latéraux du meneur. Au départ du test, les quatre véhicules sont alignés les uns derrière les autres à une distance d'environ 1,8 m du mur de gauche. Cette distance correspond à un ratio d'environ 0,6 puisque la largeur du corridor est de 3 m. À chaque 30 secondes, le ratio désiré passe de 0,4 à 0,6. Cette variation de ratio équivaut à un déplacement latéral d'environ 600 mm. La durée d'un test est de 2 minutes, ce qui correspond à quatre changements

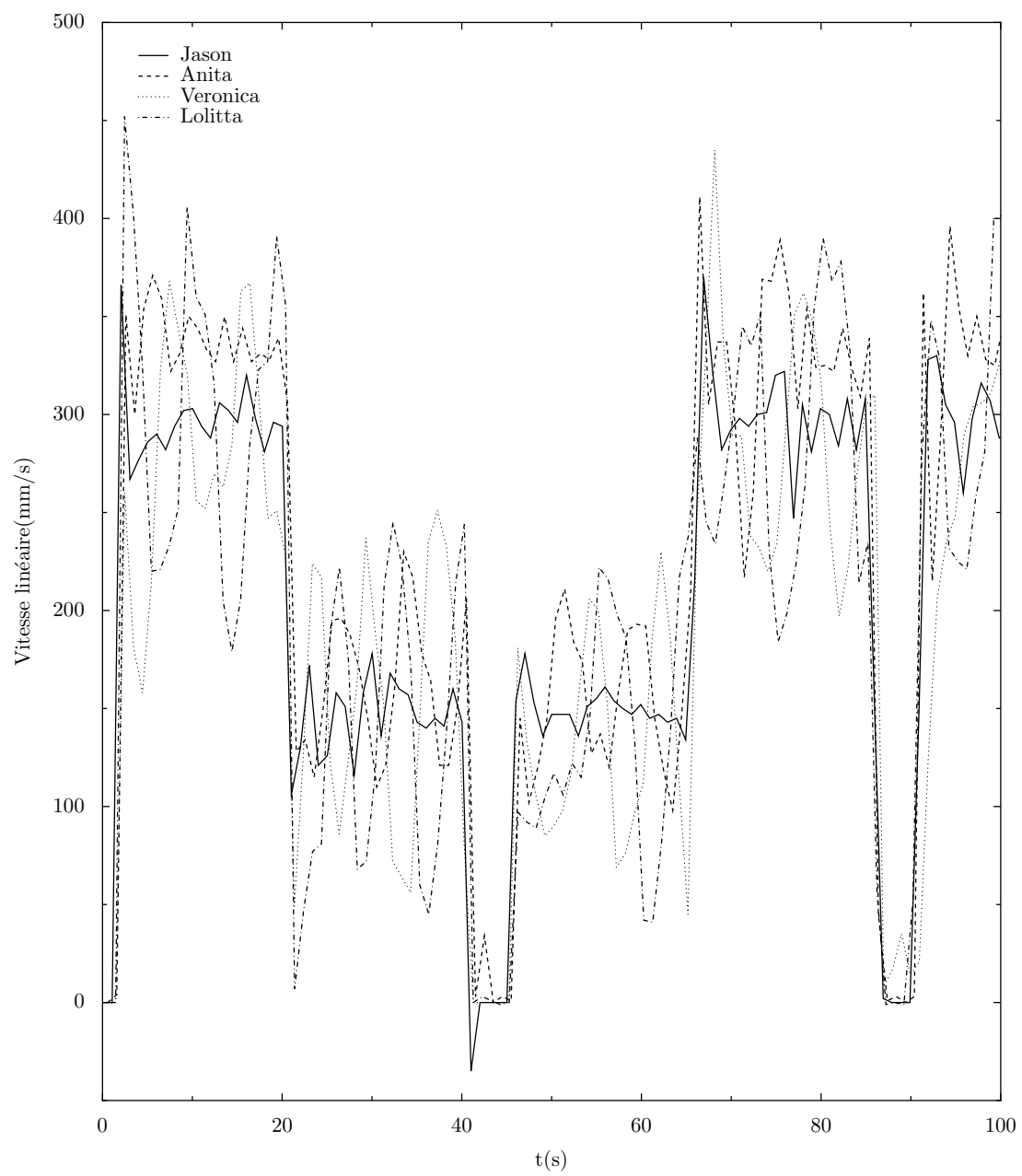


Figure 6.2 Vitesse longitudinale des véhicules

de voie par test. La figure 6.3 illustre la variation du ratio et la capacité du meneur à s'ajuster aux variations de sa consigne. Au total, 10 essais ont été réalisés résultant en 40 changements de voie.

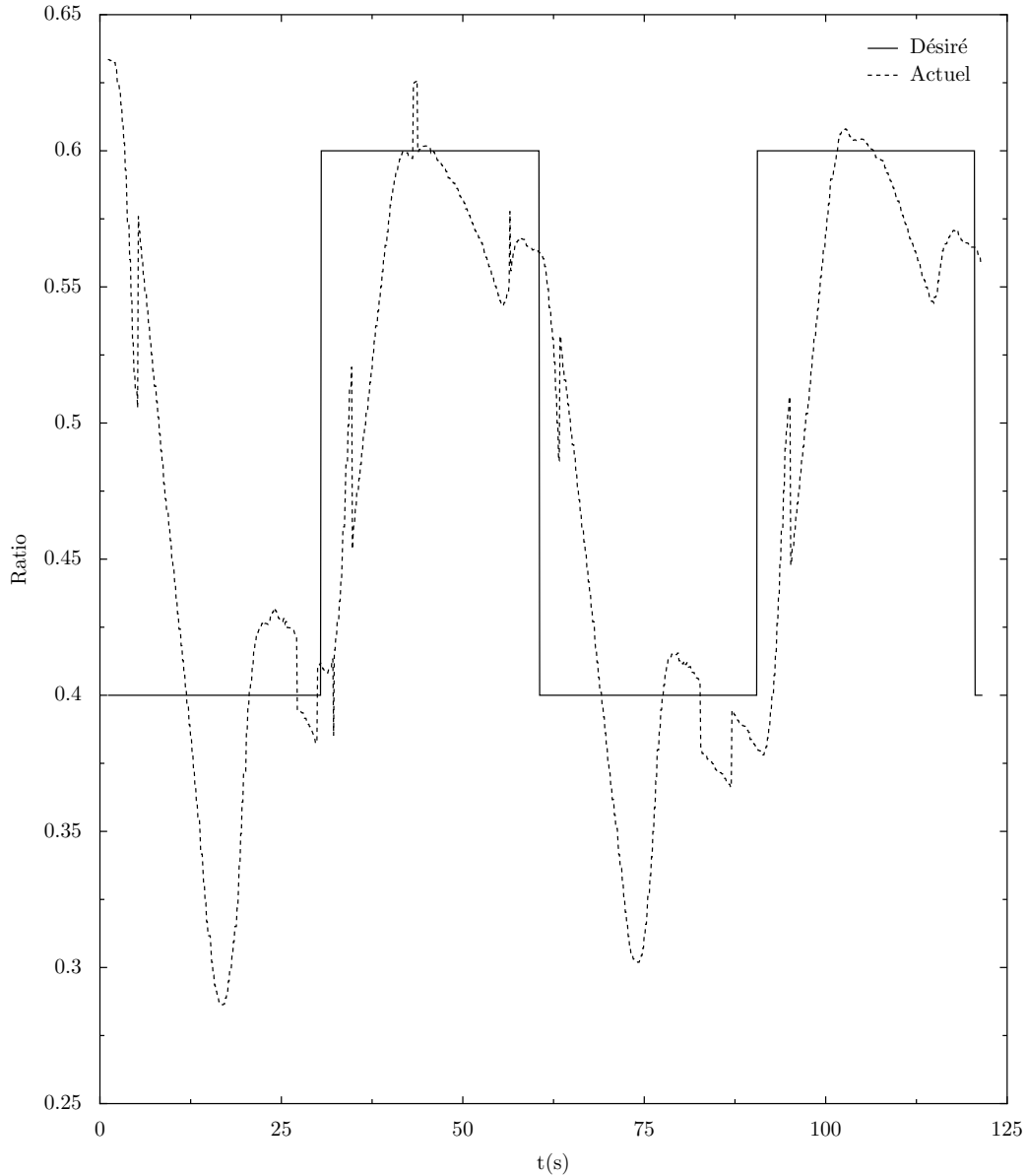


Figure 6.3 Variation du ratio de la position désirée du meneur en fonction du temps

Parmi les observations faites lors de la réalisation des tests, il est évident que les faiblesses du système de positionnement relatif sont perceptibles dans le comportement des véhicules. Lorsque le véhicule de tête amorce son changement de voie, son suiveur met du temps à percevoir que son meneur se déplace latéralement. Ce délai est dû aux tolérances ajoutées aux comportements de suivi de véhicule pour palier aux limitations du système

de positionnement (voir section 5.3). Cette dynamique se propage vers l'arrière du train, ce qui fait en sorte que le véhicule de queue prend beaucoup de temps pour compléter la distance latérale de 600 mm du changement de voie. Ce résultat est cohérent avec les ajustements réalisés aux contrôleurs du comportement de suivi de véhicule qui est exploité tout au long de cette expérience.

Néanmoins, outre le délai évident dans la détection du déplacement latéral des véhicules, le contrôleur de suivi de véhicule répond aux exigences du test, et le train est en mesure d'effectuer des changements de voie. La figure 6.4 présentent les distances latérale et longitudinale relatives de chaque véhicule par rapport a son meneur. Le tableau 6.3 présente les statistiques sur les performances du système.

Tableau 6.3 Erreurs du suivi de véhicule en changement de voie

Axe	Statistique	Anita	Veronica	Lolitta
Longitudinal	Minimum (mm)	-232	-270	-542
	Maximum (mm)	256	200	218
	Moyenne (mm)	14	-35	-33
	Écart-type (mm)	47	64	93
Latéral	Minimum (mm)	-596	-515	-448
	Maximum (mm)	486	751	1192
	Moyenne (mm)	-11	59	-3
	Écart-type (mm)	193	198	175

Au niveau du contrôle des véhicules selon l'axe longitudinal, les performances des véhicules pour ce test sont similaires au précédent. Cela indique que les véhicules sont en mesure de se suivre l'un derrière l'autre à la distance de 1,5 m avec fiabilité. Concernant l'axe latéral, les moyennes sont près de zéro à l'exception de la moyenne de Véronica. Cette dernière possède une erreur en régime permanent plus élevé. Cela n'a rien de surprenant puisque Véronica possède les plus grands écarts-types sur le test précédent et sur le test à l'état stationnaire présenté à la section 5.3. Les écarts-types des véhicules selon l'axe latéral sont plus élevés que lors du test de suivi en ligne droite. Ces variations s'expliquent par les nombreux changements d'orientation effectués par les véhicules. Cependant, les statistiques indiquent que le comportement de suivi de véhicule est apte à suivre son meneur même quand celui effectue un changement de direction.

6.1.3 Insertion et retrait

Le test d'insertion et de retrait de véhicules dans le train de véhicules est un scénario de test qui valide le comportement des manœuvres de bases, s'insérer dans le train, quitter le

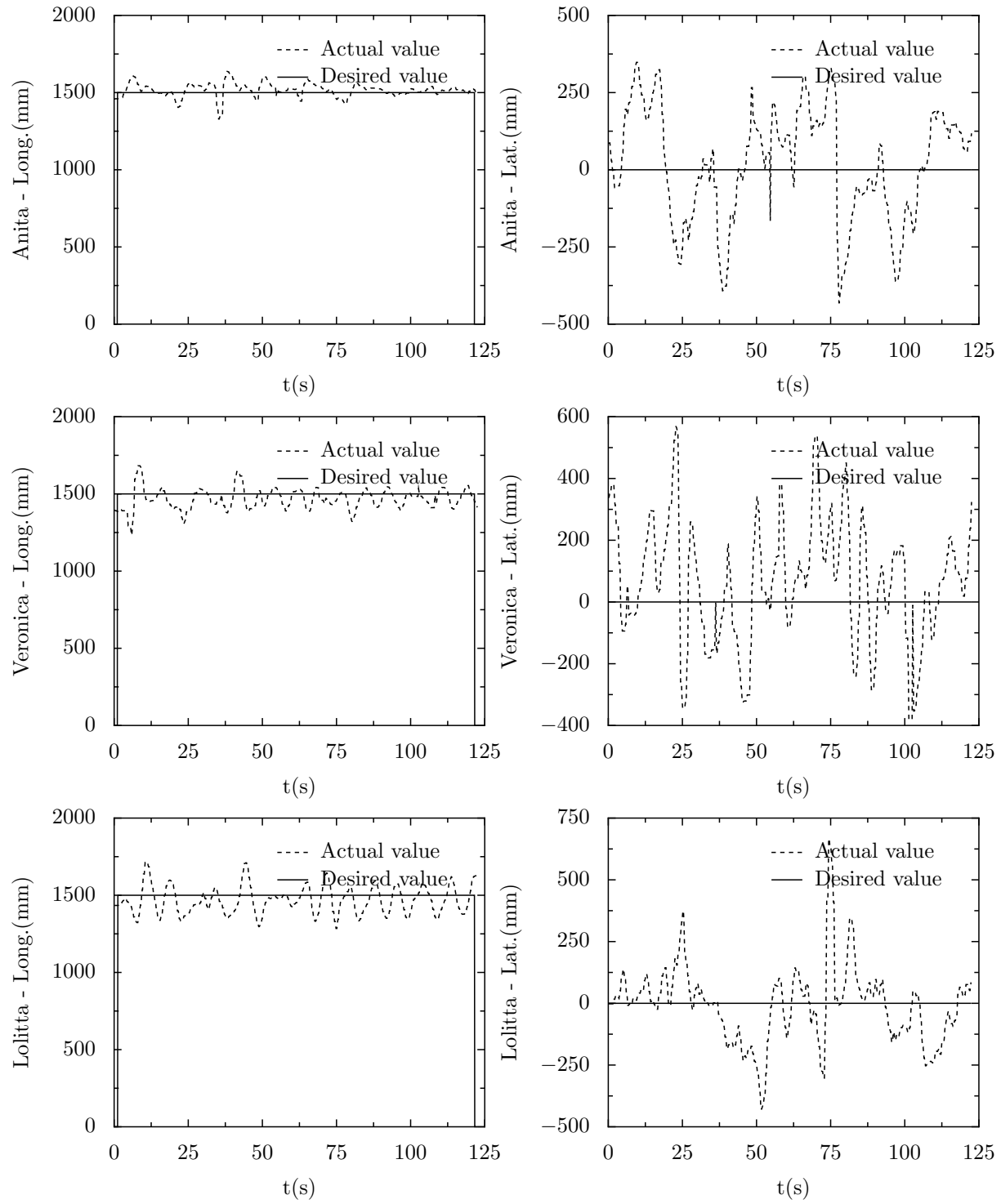


Figure 6.4 Distances du suivi de véhicule en virage

train, collaborer à un retrait et collaborer à une insertion. Pour ce test, l'environnement est virtuellement scindé en deux voies distinctes. La voie de gauche est celle réservée au train de véhicules et celle de droite aux véhicules autonomes. Au départ, un train de deux véhicules se situe dans la voie de gauche et deux véhicules autonomes sont présents dans la voie de droite. Dans leur état de véhicule autonome, les véhicules exploitent le comportement *Rechercher un train* qui utilise un algorithme de suivi de mur à l'aide des sonars. Les véhicules tentent de conserver une distance fixe de 700 mm avec le mur droit du corridor. La vitesse de croisière des véhicules autonomes est fixée à 200 mm/s et celle du train à 300 mm/s. Puisque le train circule plus rapidement que les véhicules autonomes, ces derniers se font dépasser et profitent de ce moment pour réaliser une manœuvre d'insertion. Dans un premier temps, une insertion au centre du train est réalisée et par la suite une insertion à l'arrière du train est réalisée. Dans un deuxième temps, le train est maintenu en régime permanent pendant 10 secondes. Finalement, le test se termine par le retrait successif des deux mêmes véhicules qui ont procédé aux insertions. La figure 6.5 illustre les variations de configuration des véhicules au court de l'expérimentation.

En plus de valider l'insertion et le retrait des véhicules dans le train, ce test valide un des choix de design de l'architecture qui impose qu'une seule manœuvre à la fois soit exécutée dans le train. C'est-à-dire que les insertions et les retraits s'effectuent les uns après les autres et jamais de façon concurrente. Les tableaux B.1 et B.2 présentent l'ensemble des messages qui sont échangés entre les véhicules dans le temps, et les tableaux B.3 et B.4 présentent les variations aux modèles des véhicules pour la section des insertions et la section des retraits respectivement.

Dans les premières secondes du test, les véhicules autonomes se font dépasser par le train de véhicules. Anita et Véronica détectent des meneurs potentiels et informent l'ordinateur de contrôle qui régit l'exécution du test. À 13.92 sec, ce dernier commande l'insertion de Veronica dans le train. Véronica demande l'autorisation de s'insérer à Jason qui deviendra son futur meneur et à Lolitta qui deviendra son futur suiveur. L'insertion est autorisée par les deux véhicules. Dès 14.07 sec, Jason et Lolitta sont dans l'état *Collaboration insertion*. Cela n'affecte pas le comportement de Jason qui continue de mener le train, mais Lolitta réduit sa vitesse afin de faire passer sa distance de suivi avec Jason de 1.5 m à 3 m. À 21.31 sec, Lolitta a créé suffisamment d'espace et informe Véronica. Avant de recevoir ce message, Véronica est dans l'état *Approche* et conserve une distance relative de 1.5 m selon l'axe longitudinal et de 0.75 m selon l'axe latéral avec Jason. Cette position d'approche est utilisée pour visualiser l'état du véhicule avant son insertion, et pour faciliter l'insertion. Dès qu'elle reçoit le message de Lolitta, elle passe à l'état *Insertion*. L'insertion

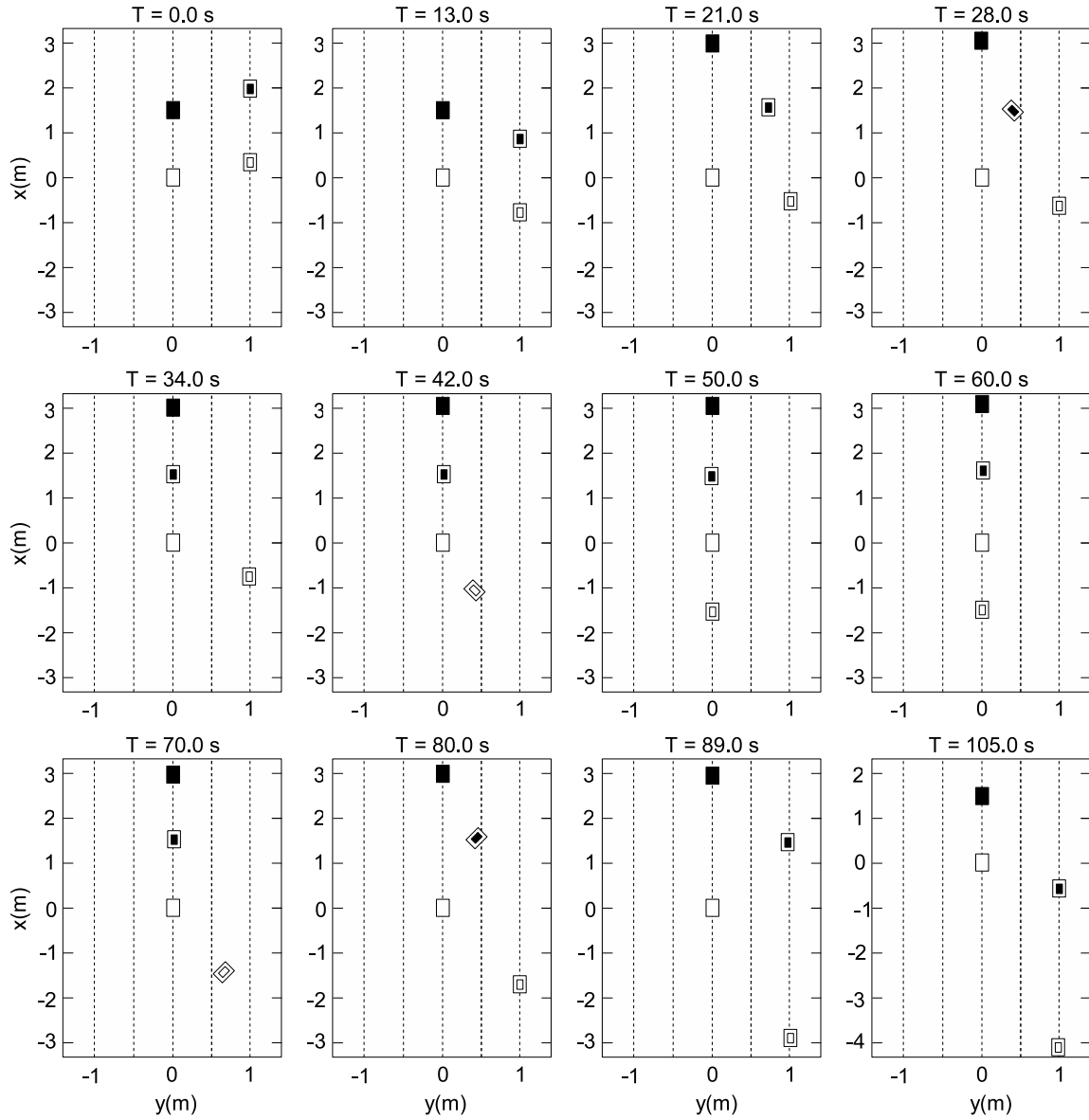


Figure 6.5 Mouvement des véhicules dans le test d'insertion et de retrait.

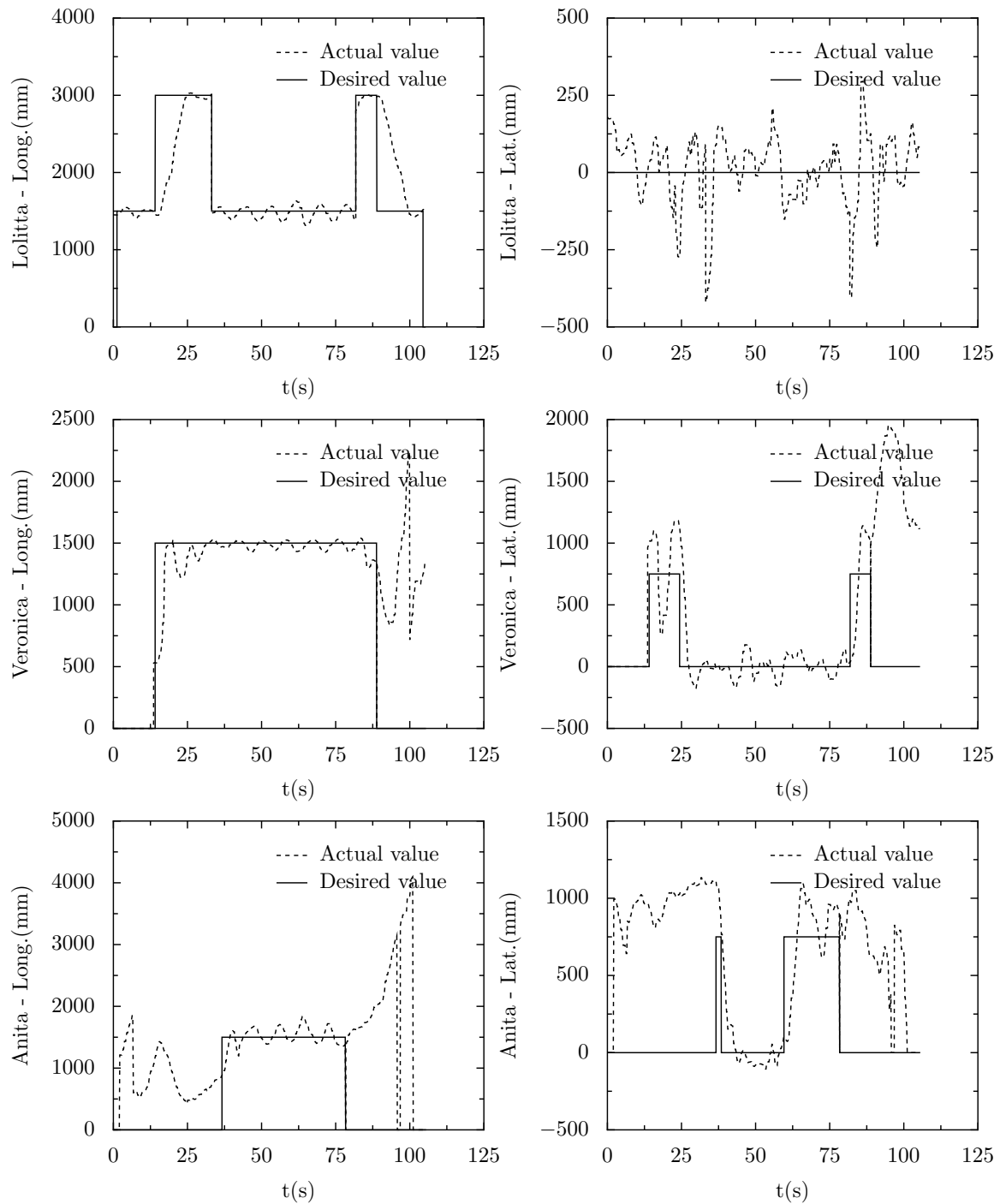


Figure 6.6 Suivi de véhicule pendant le test d'insertion et de retrait

est complétée à la seconde 33.12. Pendant que Jason et Lolitta collaborent à l'insertion de Véronica, l'ordinateur de contrôle donne l'ordre à Anita de s'insérer derrière Lolitta ($T=16.05$ sec). Anita se voit refuser la manœuvre par Lolitta puisqu'elle collabore déjà à l'insertion de Véronica. Ce comportement valide que l'architecture ne supporte qu'une seule manœuvre à la fois. Afin de faire en sorte qu'Anita ne se fait pas distancer par le train de véhicule et pour lui permettre de s'insérer plus tard dans le test, l'ordinateur de contrôle modifie la vitesse de déplacement de Anita en l'augmentant à 275 mm/s ($T=17.23$ sec).

À partir de 36.53 sec, Anita reçoit l'ordre de s'insérer derrière Lolitta. La manœuvre est autorisée et Anita n'a pas besoin d'attendre après la réception d'un message lui indiquant que l'espace nécessaire pour s'insérer est disponible puisque l'insertion s'effectue à l'arrière du train. Ainsi, elle transite rapidement de l'état *Approche* à l'état *Insertion*. Une fois l'insertion terminée ($T=49.08$ sec), le train de quatre véhicules est maintenu en régime permanent pendant 10 secondes.

À partir de 59.42 sec, l'ordinateur de contrôle commande à Anita de se retirer du train. Pendant que le retrait s'effectue, Veronica reçoit également le même ordre. On remarque que cette manœuvre est acceptée par Jason qui n'a pas conscience du retrait d'Anita, mais elle est refusée par Lolitta qui est en collaboration avec Anita pour son retrait. À 61.77 sec, Veronica informe Jason qu'elle ne procédera pas à son retrait. Jason revient donc à son état de *Meneur*. Lorsque le retrait d'Anita est complété ($T=78.27$ sec), l'ordre de retrait est renvoyé à Veronica qui procède à son retrait. À la fin de l'expérimentation, le train est composé de Jason et de Lolitta. Veronica et Anita sont à nouveau des véhicules autonomes.

Analyse et problèmes rencontrés

Pour obtenir les 10 essais requis pour garantir la répétabilité de l'architecture, 14 essais ont été réalisés. Le tableau 6.4 présente les temps d'exécution pour les manœuvres d'insertion, de retrait et pour les approches précédant les insertions. Les essais 1, 5, 6 et 7 représentent les échecs. Dans le cas de l'essai 1, toutes les manœuvres ont réussi, mais une défaillance des sonars sur Anita à la toute fin de l'expérimentation a causé son échec. Il arrive que les données des sonars indiquent que le véhicule est beaucoup plus près du mur que sa position réelle. Le comportement éloigne le véhicule et l'amène ainsi vers le centre du corridor. Ce déplacement s'apparente à un changement de voie et invalide l'essai. La cause de l'échec de l'essai 6 est identique à l'essai 1, mais la défaillance des sonars survient plus tôt dans l'expérimentation. En effet, Anita n'était pas en mesure de rester parallèle au

mur et traverse le corridor. L'expérimentateur a interrompu l'expérience après l'insertion de Véronica.

Les échecs des essais 5 et 7 sont causés par le système de navigation à l'estimé qui accumule une dérive trop importante pendant la manœuvre de retrait. Lorsque la position relative de suivi désirée du comportement de suivi de véhicule change, le comportement enregistre l'orientation courante du véhicule. Par la suite, le comportement contrôle le véhicule pour respecter la nouvelle position relative. Afin de réactiver la sortie *surCible* du comportement indiquant que la nouvelle position relative est respectée, le comportement vérifie que la position relative désirée est respectée et que l'orientation du véhicule est équivalente à l'orientation initiale du véhicule. Considérant qu'une dérive est inévitable avec ce système de navigation, une tolérance de 6 degrés est utilisée pour valider que le véhicule possède une orientation équivalente que lorsque la position relative à respecter a changé. Lors de deux essais, la dérive du système de navigation d'Anita fut plus importante que la tolérance et la sortie du comportement *surCible* n'a jamais été réactivée. Conséquemment, la transition T8 (voir figure 4.3) permettant au véhicule de passer de l'état *Retrait* à l'état *Agent libre* ne s'est pas produite. Le véhicule reste donc coincé dans l'état de retrait et l'expérimentation échoue.

Le tableau 6.4 présente les statistiques sur le temps d'exécution des manœuvres au sein de l'expérimentation. Pour Véronica, les écarts-types sont petits, ce qui indique que l'exécution des manœuvres est très similaire d'un essai à l'autre. Le temps d'approche moyen est de 10.18 secs. Ce temps représente le temps requis par Lolitta pour laisser la place nécessaire à Véronica pour s'insérer. Dans l'état *Approche*, Véronica conserve une position relative par rapport à Jason de 1.5 m selon l'axe longitudinal et de 0.7 m selon l'axe latéral. La manœuvre d'insertion au centre prend en moyenne 7.62 secs et celle de retrait par le centre d'environ 7.52 secs. Pour Anita, les écarts-types varient beaucoup plus puisqu'elle présente une usure mécanique plus importante que Véronica. Les changements de direction sont toujours plus difficiles à exécuter avec elle. Cette usure mécanique contribue à augmenter la dérive du système de positionnement à l'estime et c'est parfois plus long pour Anita de détecter qu'elle respecte la position relative par rapport à son meneur. Ce problème a causé les échecs des essais 5 et 7 et contribue également à la variation des temps d'exécution. Pour l'insertion à l'arrière du train, le temps d'approche est minime puisque l'espace pour procéder à l'insertion est toujours disponible.

Tableau 6.4 Temps d'exécution des manœuvres.

Essai	Véronica			Anita		
	Approche (sec)	Insertion (sec)	Retrait (sec)	Approche (sec)	Insertion (sec)	Retrait (sec)
1	9.84	8.75	6.09	0.72	13.29	16.46
2	10.03	7.78	8.81	0.61	12.77	18.83
3	10.30	8.39	9.02	2.68	9.66	18.53
4	10.28	8.12	7.77	0.54	12.24	17.34
5	10.42	6.94	-	3.00	2.83	-
6	9.96	7.13	-	-	-	-
7	9.41	7.88	-	0.67	1.33	-
8	9.98	7.29	6.91	0.49	5.95	24.87
9	10.31	6.63	7.12	0.61	9.96	12.46
10	10.10	7.36	6.96	0.43	14.14	17.90
11	10.28	8.74	6.90	1.83	10.70	18.75
12	9.88	7.06	9.54	0.61	14.32	19.52
13	10.96	7.28	7.03	0.60	14.62	13.68
14	10.80	7.30	6.61	0.45	13.44	16.22
Moyenne	10.18	7.62	7.52	1.02	10.40	17.69
Écart-type	0.39	0.67	1.11	0.89	4.42	3.24

6.2 Opération lors d'une collision

La section 6.1 illustre le fonctionnement de l'architecture pour les conditions normales d'utilisation. Bien que le test d'insertion et de retrait représente la pierre angulaire de l'architecture et valide la plupart des manœuvres désirées au sein d'un train de véhicule, la robustesse et l'efficacité de l'architecture se trouvent par les prises de décisions réalisées lorsqu'un événement imprévu perturbe l'opération normale du système.

Un type d'événement imprévu est la collision d'un véhicule membre ou à proximité du train de véhicules. Lors d'une collision, le mandat premier des véhicules est de réagir de façon sécuritaire afin d'éviter à leur tour d'entrer en collision. Un total de huit scénarios de test ont été effectués afin de valider la réponse de l'architecture aux collisions pouvant survenir avec un groupe de quatre véhicules. Chacun de ces scénarios assume que le système de positionnement relatif LAMP demeure fonctionnel sur le véhicule subissant la collision. L'éventualité où le système de positionnement relatif serait détruit pendant la collision n'est pas considérée puisque les véhicules devraient se baser sur une autre source d'information pour localiser le véhicule accidenté. Étant donné le mal fonctionnement des sonars, aucun capteur alternatif n'était disponible.

Considérant le coût et la fragilité des équipements utilisés dans le cadre de cette étude, aucune collision n'est délibérément réalisée sur les véhicules. Le comportement *Simuler une collision* permet d'émuler la réaction d'un véhicule subissant une collision. Lorsque l'ordinateur de contrôle commande à un véhicule de simuler une collision, ce dernier change brusquement de trajectoire en se mettant de travers par rapport au sens de déplacement du train. Cette réaction met aux défis les véhicules se dirigeant vers le lieu de la collision de réagir rapidement et correctement à cette situation impromptue.

La réaction des véhicules lors d'une collision est régie par des lignes directrices partagées par l'ensemble des véhicules. La première règle d'éthique lors d'une collision est de relayer l'information aux véhicules à proximité. Suite à la réception du message annonçant la collision, les véhicules passent soit à l'état : *Arrêt d'urgence*, *Manœuvre d'Urgence* ou *Sortie d'Urgence*. Pour le véhicule qui subit la collision, la transition est systématiquement celle à l'état *Arrêt d'urgence*. Cette transition est évidente, car le véhicule est accidenté et non fonctionnel. Pour les véhicules à proximité du véhicule accidenté, la réaction dépend de leur position relative par rapport à l'endroit de la collision.

Dans l'éventualité où la collision survient en aval d'un véhicule, deux scénarios sont possibles. Si le véhicule possède la distance de freinage nécessaire pour s'immobiliser avant d'atteindre le lieu de la collision, le véhicule passe à l'état *Arrêt d'urgence*, sinon le véhicule transitionne à l'état *Manœuvre d'urgence*. Dans cet état, le véhicule évite le véhicule accidenté et reforme le train de véhicules par la suite lorsque c'est possible. Pour une automobile, la distance de freinage dépend de l'inertie du véhicule et peut être considérable. Dans le cas des véhicules autonomes utilisés, l'inertie est faible et les véhicules peuvent s'immobiliser à tout instant. Par souci de réalisme, les règles suivantes sont introduites :

- un véhicule dont son meneur subit une collision assume qu'il ne possède pas la distance de freinage nécessaire pour s'immobiliser et doit exécuter la manœuvre d'urgence ;
- un véhicule qui est informé d'une collision en aval et dont le véhicule accidenté n'est pas son meneur assume qu'il possède la distance de freinage nécessaire pour réaliser un arrêt d'urgence.

Lorsque la collision survient en arrière d'un véhicule, les véhicules passent à l'état *Manœuvre d'urgence*. Puisque la collision a lieu en amont, les véhicules membres continuent d'exploiter le comportement de suivi de véhicule jusqu'à ce que le meneur du train s'immobilise. Ce dernier passe toujours à l'état *Manœuvre d'urgence* et poursuit son suivi de

mur afin de se distancer de l'endroit de la collision. Il s'immobilise après avoir parcouru 3 m à partir de sa position lors de la réception du message de collision.

Finalement, la transition à l'état *Sortir d'urgence* survient dans les scénarios de tests où la collision survient pendant une manœuvre de retrait.

6.2.1 Collision du meneur

La base du fonctionnement des trains de véhicules à l'étude impose la présence d'un meneur de train afin d'assurer le contrôle latéral et longitudinal des déplacements. Une collision sur le meneur du train implique qu'aucun véhicule ne peut continuer d'opérer normalement. Au départ du test, un train de quatre véhicules est formé avec Jason comme meneur, suivi d'Anita, de Véronica et de Lolitta. Lorsqu'ils reçoivent le message indiquant la collision, Véronica et Lolitta effectuent un arrêt d'urgence puisqu'ils sont loin du véhicule qui subit la collision. Puisqu'Anita est directement derrière Jason, elle réagit d'urgence pour éviter d'entrer en collision avec ce dernier. Cette réaction consiste à éviter le véhicule et à tenter de reformer le train. Puisque la collision implique le meneur du train, aucun train ne peut être reformé et Anita s'immobilise dès qu'elle a éloigné le risque de collision. Le tableau 6.5 présente les messages échangés au cours de l'expérimentation et le tableau B.5 présente l'évolution du modèle des véhicules.

Jason simule la collision à $T=10.30$ sec, et communique l'information à Anita. Anita propage le message à Véronica qui le relait à son tour à Lolitta. Pour émuler la collision, Jason passe à l'état *Arrêt d'urgence* et exploite le comportement *Simuler une collision*. Sur réception du message de collision, Véronica et Lolitta effectuent un arrêt d'urgence en exploitant le comportement *Manœuvre d'urgence* ($T=10.44$ sec et $T=10.47$ sec). Précisons que ce comportement immobilise les véhicules puisque la collision se situe en aval et que le véhicule subissant la collision n'est pas le meneur du véhicule exploitant le comportement. Pour sa part, Anita est le suiveur immédiat de Jason et doit l'éviter avant de s'immobiliser. Ainsi, elle relait l'information à Véronica et passe à l'état *Manœuvre d'urgence*. Pendant environ 6.75 sec, elle évite Jason en le contournant sur sa droite et s'immobilise en exploitant le comportement *Arrêt*. La figure 6.7 illustre le braquage de Jason du à l'impact virtuel et l'évitement d'Anita, qui modifie son orientation dans la direction opposée à la trajectoire de Jason. Suite à l'évitement, Anita s'immobilise ($T=17.25$ sec).

Aucune défaillance n'a été observée sur les dix essais réalisés pour ce test.

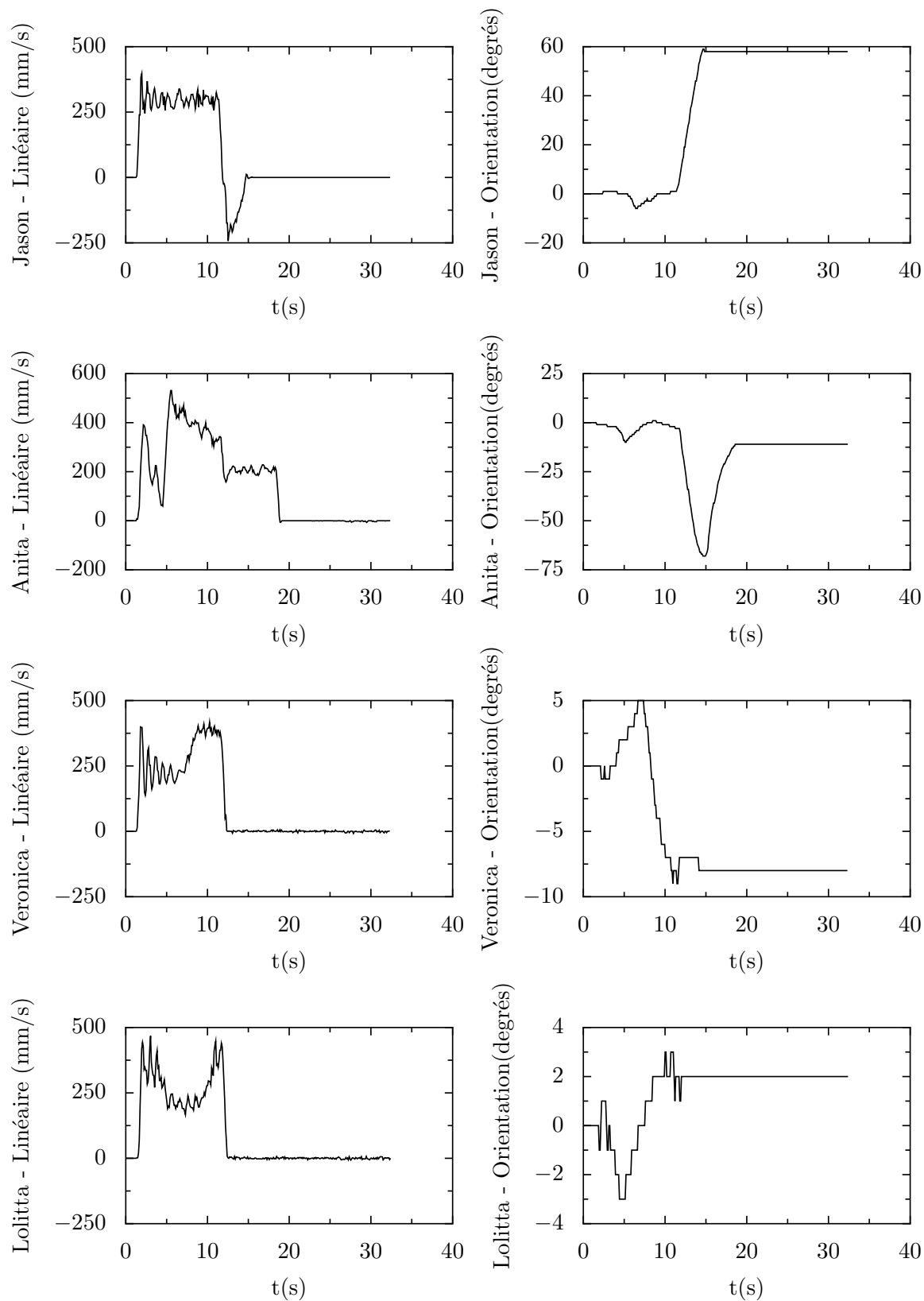


Figure 6.7 Vitesse linéaire et orientation des véhicules pendant le test de collision du meneur.

Tableau 6.5 Messages échangés dans le test de collision du meneur.

T(s)	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.08	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
11.22	Arret d'urgence	<i>Arret d'urgence</i>		
11.23		Arret d'urgence	<i>Arret d'urgence</i>	
11.24			Arret d'urgence	<i>Arret d'urgence</i>
31.28	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>

6.2.2 Collision d'un membre

La collision d'un membre du train de véhicule est très similaire avec le test de collision avec le meneur. En effet, le train est initialement configuré de la même façon. Au lieu d'avoir une collision sur le meneur du train, c'est le deuxième véhicule (Anita) qui subit la collision. La figure 6.8 illustre le déroulement du test, alors que la figure 6.9 présente la vitesse linéaire et l'orientation des véhicules. Les tableaux 6.6 et B.6 présentent l'échange des messages, ainsi que l'évolution du modèle des véhicules au cours de l'expérimentation.

La collision a lieu à $T=10.37$ s et Jason passe à l'état *Manœuvre d'urgence*. Dans ce mode, le meneur du train diminue sa vitesse à 200 mm/s et exploite le comportement de suivi de mur pendant une distance de 3 mètres. Lors du passage à l'état *Manœuvre d'urgence*, le meneur note que Véronica est maintenant son nouveau suiveur. Une transition similaire est observée chez Véronica. Lors de la réception du message de collision, Véronica change de meneur et considère maintenant Jason comme son meneur. Elle considère également Anita comme le véhicule accidenté qu'elle doit éviter. L'exploitation du comportement *Manœuvre d'urgence* de la seconde 10.37 à la seconde 18.06 permet à Véronica d'éviter d'entrer en collision avec Anita. La figure 6.9 illustre qu'Anita s'oriente vers la gauche et recule pendant 300 ms. Au même moment, Véronica l'évite en se dirigeant dans la droite et exploite le comportement de suivi de véhicule afin d'aller reformer le train derrière Jason dès qu'elle a dépassé Anita. À la seconde 35.62, Jason a parcouru la distance de 3 mètres et il avertit Véronica qu'il s'immobilise en exploitant le comportement *Parcourir distance*. Pour sa part, Lolitta s'immobilise d'urgence dès la réception du message de la collision. Sur les 10 essais réalisés pour ce test, aucun échec n'est survenu.

6.2.3 Collision en aval d'une insertion

Ce test valide le comportement d'un véhicule qui s'insère dans le train lorsqu'une collision survient en aval de sa position. Au début de l'expérimentation, le train est composé de Jason, de Véronica et de Lolitta. Pour sa part, Anita est en conduite autonome et procédera

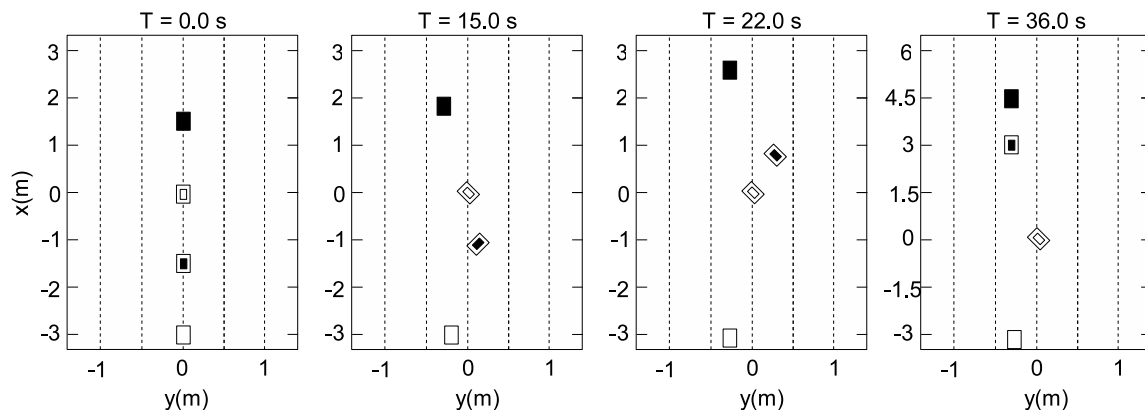


Figure 6.8 Mouvement des véhicules dans le test de collision d'un membre.

Tableau 6.6 Messages échangés lors de la collision d'un membre.

T(s)	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.08	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
11.24	<i>Arret d'urgence</i>	<i>Arret d'urgence</i>	<i>Arret d'urgence</i>	
11.25			<i>Arret d'urgence</i>	<i>Arret d'urgence</i>
35.62	Nouvelle vitesse		<i>Nouvelle vitesse</i>	
35.63			Nouvelle vitesse	<i>Nouvelle vitesse</i>
36.23	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>

à l'insertion. L'insertion s'effectue derrière Véronica et la collision a lieu sur cette dernière. Puisque Anita se dirige vers le lieu de la collision, le comportement attendu est d'éviter d'urgence la collision et de reformer le train de véhicules par la suite. Sachant que la voie dans laquelle Anita circulait avant l'insertion est libre, elle l'utilise pour réaliser la manœuvre d'urgence. Par la suite, elle reforme le train en se plaçant derrière Jason. Pour leurs parts, Jason parcourt la distance de 3 mètres et s'immobilise, et Lolitta s'immobilise d'urgence dès la réception du message de collision. La figure 6.10 illustre les moments clés de cette expérimentation.

Le tableau 6.7 présente les messages échangés et le tableau B.7 présente les variations aux modèles de chaque véhicule au cours de l'expérimentation. La seconde 21.68 indique le début de l'insertion où Anita s'insère entre Véronica et Lolitta. Lolitta crée l'espace suffisant pour l'insertion et le changement de voie d'Anita s'amorce à la seconde 31.19. Un peu plus de trois secondes plus tard, Véronica simule la collision. Jason et Anita passent à l'état *Manœuvre d'urgence*. En transitionnant à cet état, Anita considère Jason comme son nouveau meneur et conserve Lolitta comme suiveur. Puisque la collision survient devant elle, Anita évite d'urgence Véronica et reforme le train en exploitant le comportement de

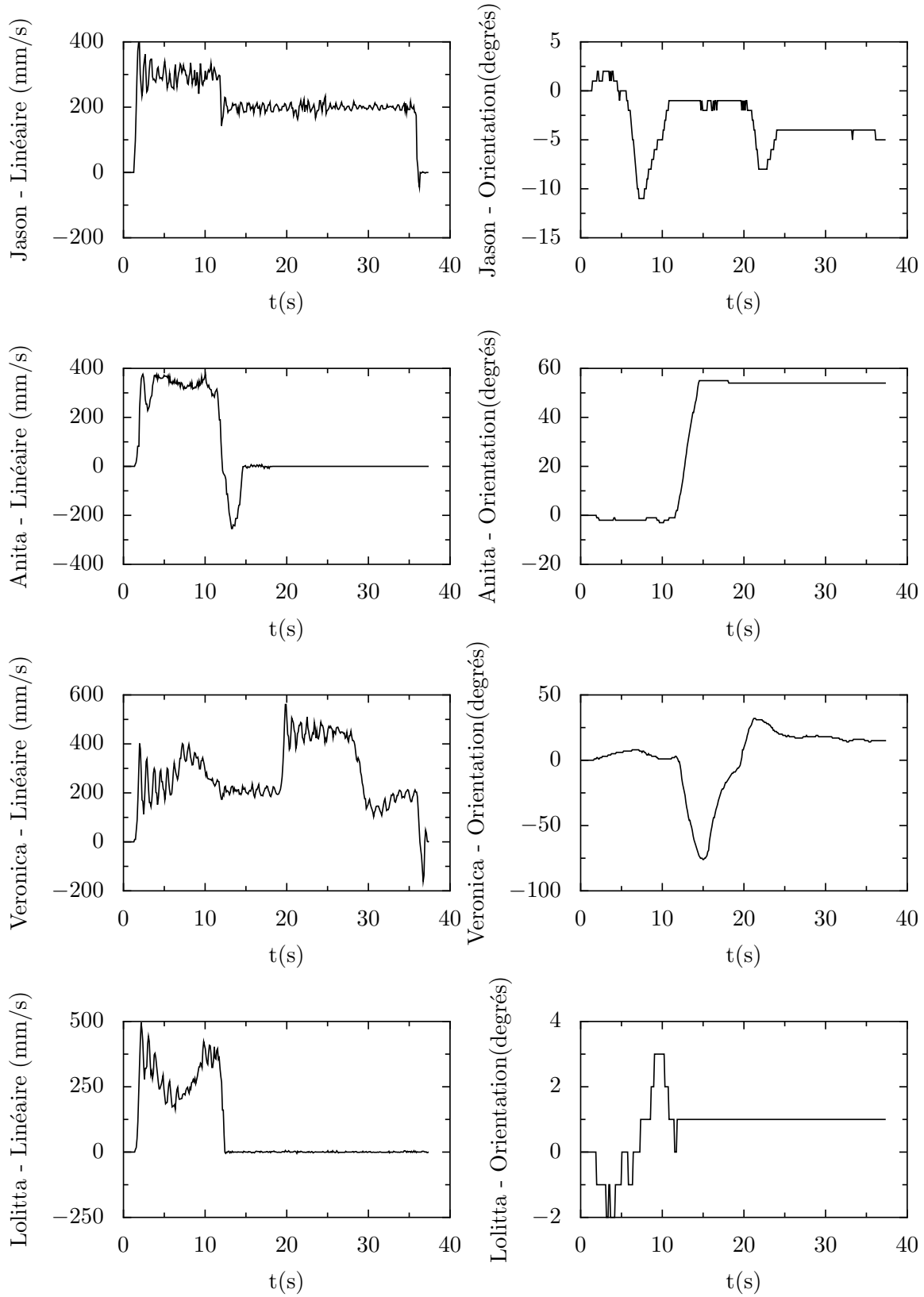


Figure 6.9 Vitesse linéaire et orientation des véhicules pendant le test de collision d'un membre

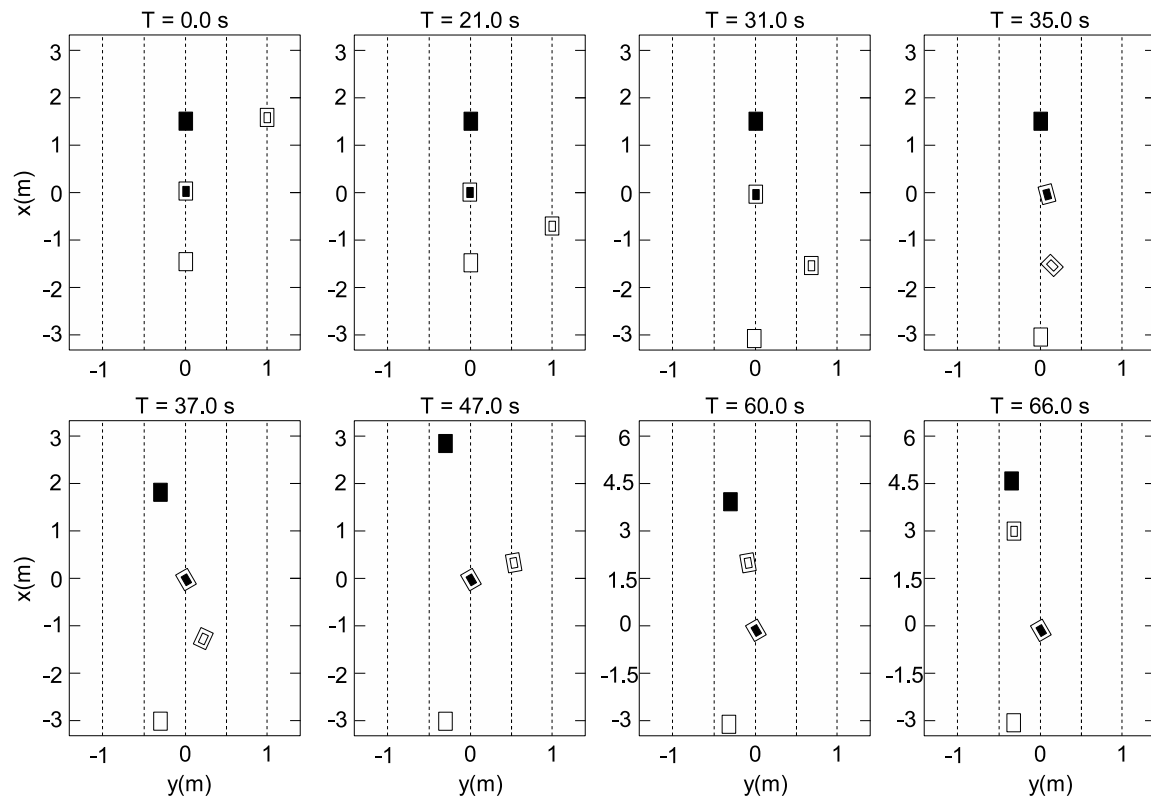


Figure 6.10 Mouvement des véhicules dans le test de collision en aval d'une insertion.

suivi de véhicule à partir de la seconde 31.19. La figure 6.11 fournit la vitesse linéaire et l'orientation des véhicules qui attestent du bon déroulement du test.

Tableau 6.7 Messages échangés lors du test de collision en aval d'une insertion.

T(s)	Jason	Veronica	Lolitta	Anita
0.08	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
6.27				Meneur potentiel
22.01				Meneur potentiel
22.30				<i>Ordre d'insertion</i>
22.31		<i>Insertion ?</i>		Insertion ?
22.31		Manœuvre(oui)		<i>Manœuvre(oui)</i>
22.42			<i>Insertion ?</i>	Insertion ?
22.61			Manœuvre(oui)	<i>Manœuvre(oui)</i>
31.80			Espace suffisant	<i>Espace suffisant</i>
32.04				Debut d'insertion
35.33	<i>Arret d'urgence</i>	Arret d'urgence	<i>Arret d'urgence</i>	<i>Arret d'urgence</i>
60.10	Nouvelle vitesse			<i>Nouvelle vitesse</i>
60.13			<i>Nouvelle vitesse</i>	Nouvelle vitesse
65.64	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>	<i>Arret s</i>

Ce scénario de test a nécessité 16 essais pour en obtenir 10 valides. Le système de navigation LAMP est responsable de tous les échecs. L'essai 4 a échoué parce que Lolitta n'a pas été en mesure de conserver une distance de 3 m avec son meneur Véronica lorsqu'elle collaborait à l'insertion d'Anita. Les données fournies par LAMP oscillaient entre une position valide de Véronica et des positions erronées. Le comportement de suivi de véhicule tentait de suivre un meneur qui se téléportait dans l'environnement. Lolitta n'a jamais été en mesure de rester dans une position stable permettant de signaler à Anita qu'elle pouvait s'insérer. L'essai 5 a échoué parce qu'Anita n'a jamais détecté de meneur. Le train de véhicules est passé à côté d'elle sans qu'elle détecte aucun véhicule. Finalement, les essais 6, 8, 12 et 13 ont échoué parce qu'Anita n'a pas détecté la présence de Lolitta. Normalement, Anita détecte Véronica comme meneur potentiel et Lolitta comme suiveur potentiel. Avant de procéder à son insertion, elle demande l'autorisation aux deux véhicules. Dans le cas de ces échecs, Anita détecte uniquement Véronica. Ainsi, elle procède à l'insertion dès que l'approbation est reçue de Véronica. Lorsque Véronica subit la collision, elle informe Anita et Lolitta. Dans cette situation, puisque Véronica est le meneur immédiat de Lolitta, Lolitta amorce une manœuvre d'urgence pour éviter d'entrer en collision avec Véronica. Anita prend également cette décision et les deux véhicules tentent d'éviter la collision avec Véronica. Le résultat est que Lolitta entre en contact avec Anita et l'expérimentateur a mis fin à l'expérimentation. Mentionnons qu'il aurait pu être possible

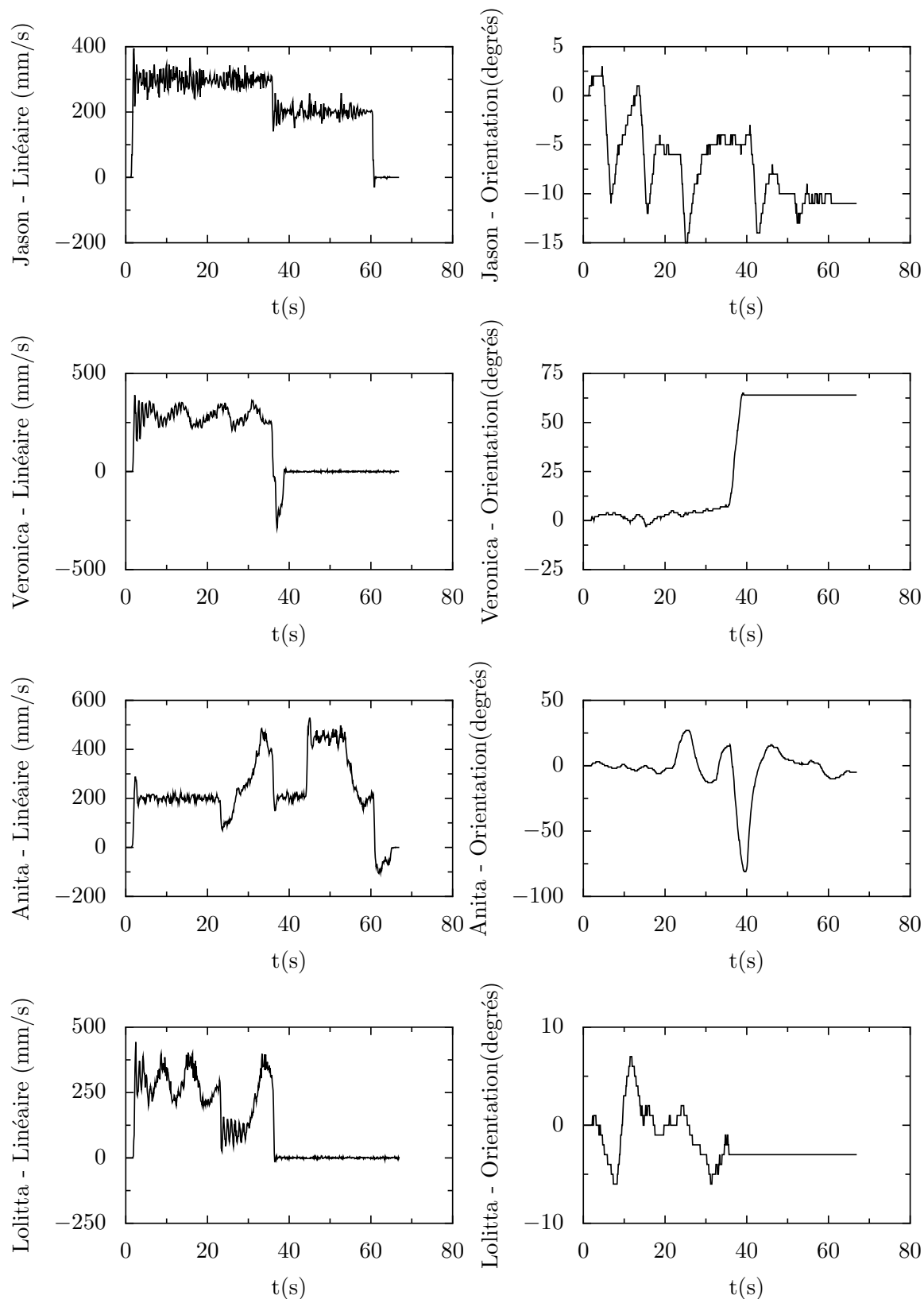


Figure 6.11 Vitesse linéaire et orientation des véhicules pendant le test de collision en aval d'une insertion

d'éviter ce comportement en utilisant la communication entre les véhicules pour fournir des informations qui permettent de valider le bon fonctionnement du capteur. Lorsqu'Anita demande l'autorisation de s'insérer à Véronica, cette dernière pourrait informer Anita que l'autorisation est conditionnelle à la décision de Lolitta. Véronica sait que Lolitta est son suiveur et en indiquant que l'insertion est conditionnelle à l'autorisation de Lolitta, Anita aurait pu détecter que son capteur était défectueux et elle aurait pu annuler sa manœuvre d'insertion et retourner comme *Agent libre*.

6.2.4 Collision en amont d'une insertion

Pour ce test de collision, un train de trois véhicules est formé avec Jason en tête, suivi de Véronica et de Lolitta. Anita utilise la voie de droite et s'insère derrière Jason. Au cours de l'insertion, Véronica simule une collision. Étant donné que la collision a lieu en amont dans le train, Anita n'a pas à effectuer une manœuvre d'urgence. Elle exploite le comportement de suivi de véhicule qui lui permet de compléter l'insertion et de s'immobiliser derrière Jason. Pour sa part, Lolitta est le suiveur immédiat de Véronica et réalise l'évitement d'urgence avant d'aller reformer le train derrière Véronica. L'existence de la collision au cours d'une insertion implique que la manœuvre d'insertion est considérée complétée et les véhicules mettent à jour leurs meneurs et suiveurs respectifs. Les tableaux B.8 et B.9 présentent les messages et les modifications aux modèles des véhicules. La figure 6.12 illustre les moments clés de cette expérimentation.

Le taux de réussite de ce test est de 83%. Deux échecs ont été enregistrés. Comme le test précédent, c'est le véhicule réalisant l'évitement d'urgence de la collision qui connaît la défaillance. Le système LAMP est moins efficace quand le véhicule à suivre est à une grande distance du véhicule considéré. Dans les deux cas d'échecs, Lolitta contourne adéquatement Véronica avant de perdre la position de son meneur Anita. Le véhicule se fie à des mauvaises estimées de position et entre en collision avec le corridor du tunnel.

6.2.5 Collision en aval d'un retrait

Au départ de ce test, le train est composé de quatre véhicules avec Jason comme meneur, suivi d'Anita, de Véronica et de Lolitta. Les tableaux B.10, B.11 et la figure 6.13 présentent l'évolution de l'expérimentation. Le retrait de Véronica du train de véhicules s'amorce à la seconde 10.31. La collision qui a lieu sur Anita survient à la seconde 14.41. Véronica passe à l'état *Sortie d'urgence* et poursuit sa manœuvre de retrait. Elle redevient véhicule autonome à la seconde 16.92. Jason réagit comme dans les autres expérimentations et

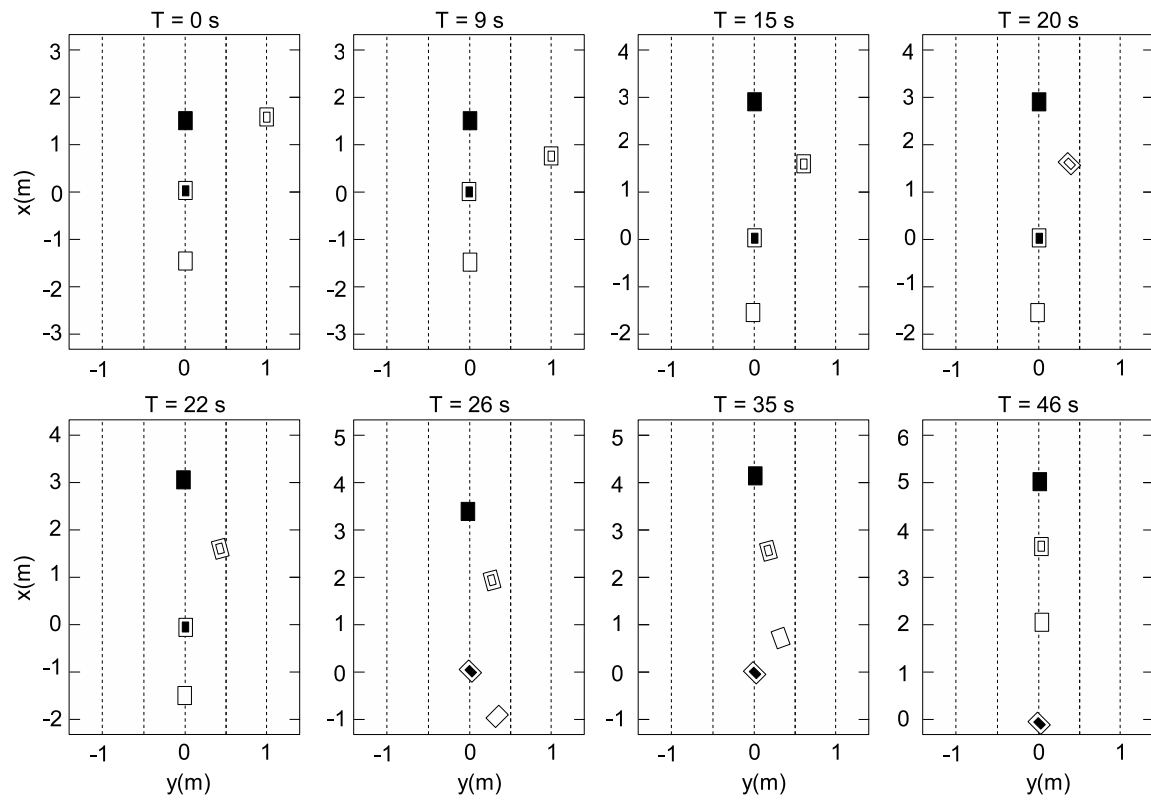


Figure 6.12 Mouvement des véhicules dans le test de collision en amont d'une insertion.

Lolitta s'immobilise d'urgence dès la réception du message. Pendant la collaboration au retrait de Véronica, Lolitta considère Anita comme son meneur. Pendant le retrait, Lolitta conserve une distance de 3 mètres avec Anita, ce qui lui garantit qu'elle possède l'espace nécessaire pour réaliser l'arrêt d'urgence, et ce même si c'est son meneur qui subit la collision. Cette décision est rendue possible par le fait que Véronica quitte le train malgré la collision. Finalement, mentionnons que le taux de réussite de ce test est de 10 sur 10.

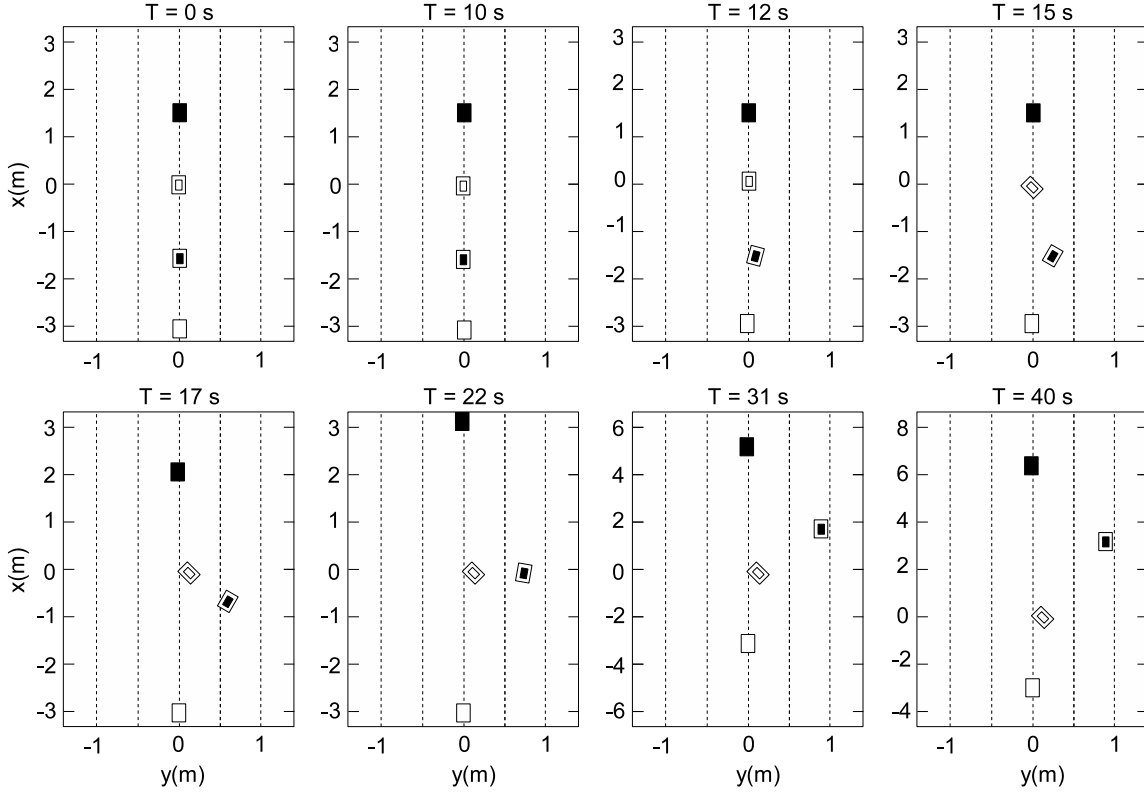


Figure 6.13 Mouvement des véhicules dans le test de collision en aval d'un retrait.

6.2.6 Collision en amont d'un retrait

Le test de collision en amont du véhicule se retirant du train débute avec la même configuration initiale que le test de retrait et de collision en aval. Lorsque la collision survient en amont du véhicule réalisant la manœuvre, le véhicule réalisant le retrait a déjà dépassé le lieu de la collision et complète sa sortie sans aucun danger. Les tableaux B.12, B.13 et la figure 6.14 présentent les informations pertinentes pour le test.

Le retrait d'Anita est commandé à la seconde 10.20 et la simulation de la collision de Véronica survient à la seconde 14.38. À cet instant, Anita passe à l'état *Sortie d'urgence* et

quitte le train en exploitant le comportement du même nom. Pour sa part, Jason continue de mener le train et s'immobilise à la seconde 38.88 en exploitant le comportement *Parcourir distance*. Puisque Véronica est le meneur immédiat de Lolitta lors de la collision, cette dernière réalise la manœuvre d'évitement d'urgence et reforme le train derrière Jason qui est devenu son nouveau meneur. La seconde 14.38 illustre cette transition dans le meneur de Lolitta. À partir de la seconde 18.02, Anita a quitté le train et revient en conduite autonome. Elle exploite le comportement de recherche de train et signale à l'opérateur des meneurs potentiels (secondes 18.02 et 21.74).

La réalisation des dix essais nécessaires pour compléter ce test s'est effectuée en onze essais. Le seul échec est dû à Lolitta qui est entrée en contact avec Anita une fois que cette dernière circulait de façon autonome dans la voie de droite. Cette erreur est attribuable au comportement de suivi de véhicule et à la qualité des estimations de la position du leader Jason fournies par LAMP.

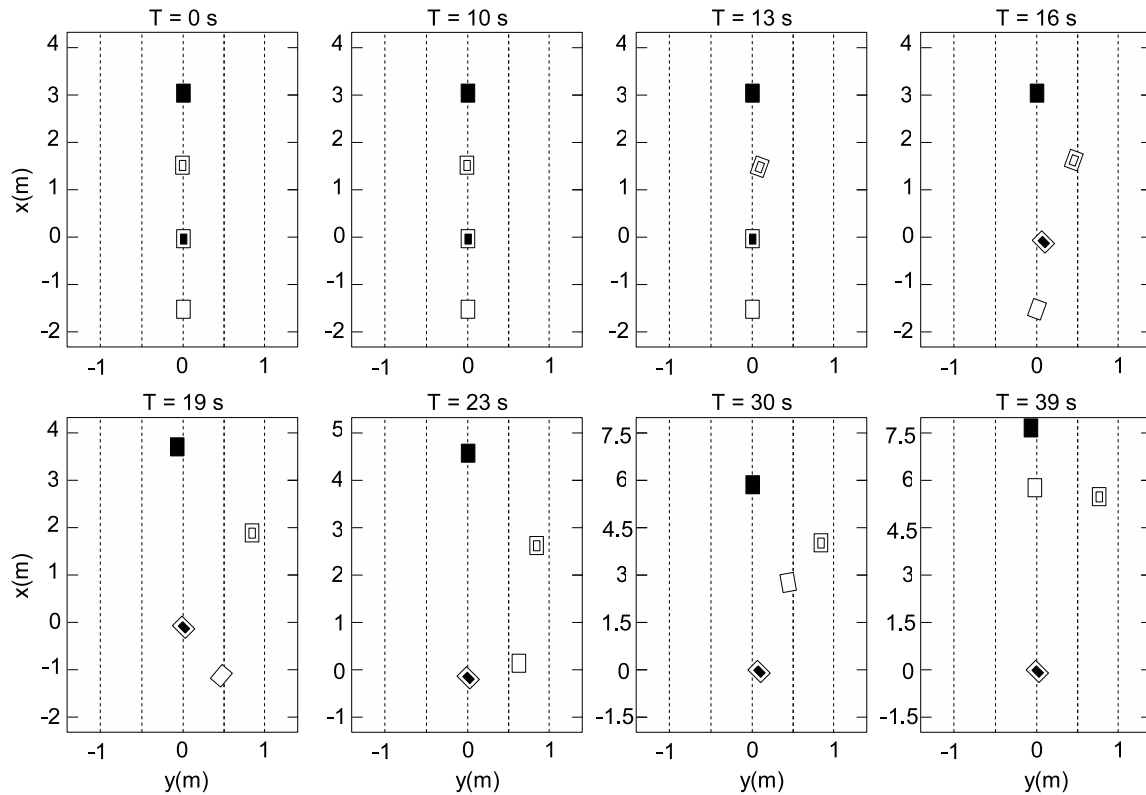


Figure 6.14 Mouvement des véhicules dans le test de collision en amont d'un retrait.

6.2.7 Collision sur le véhicule réalisant une insertion

Ce test implique la simulation d'une collision sur un véhicule réalisant une insertion dans le train de véhicules. Les tableaux B.14, B.15 et la figure 6.15 présentent les informations usuelles sur les tests. Au début du test, le train est composé de Jason, Véronica et Lolitta. À la seconde 5.38, Anita amorce une insertion entre Jason et Véronica. Environ trois secondes plus tard, Anita simule une collision. Sachant qu'Anita s'insère sur sa droite, Véronica évite Anita en la contournant sur la gauche. Par la suite, Véronica reforme le train derrière Jason. Ce dernier réagit comme dans les autres tests en parcourant une distance de 3 mètres et en s'immobilisant par la suite. Lolitta effectue un arrêt d'urgence dès la réception du message de collision qui est relayé par Véronica. Pour obtenir les dix essais requis pour valider ce test, onze essais ont été nécessaires. L'échec est attribuable au fait qu'Anita n'a jamais détecté Jason lorsque le train est passé à ses côtés pendant qu'elle était en conduite autonome. Sans la détection du meneur Jason, la requête d'insertion n'a jamais été envoyée par l'ordinateur de contrôle et la séquence de test n'a pas pu être amorcée.

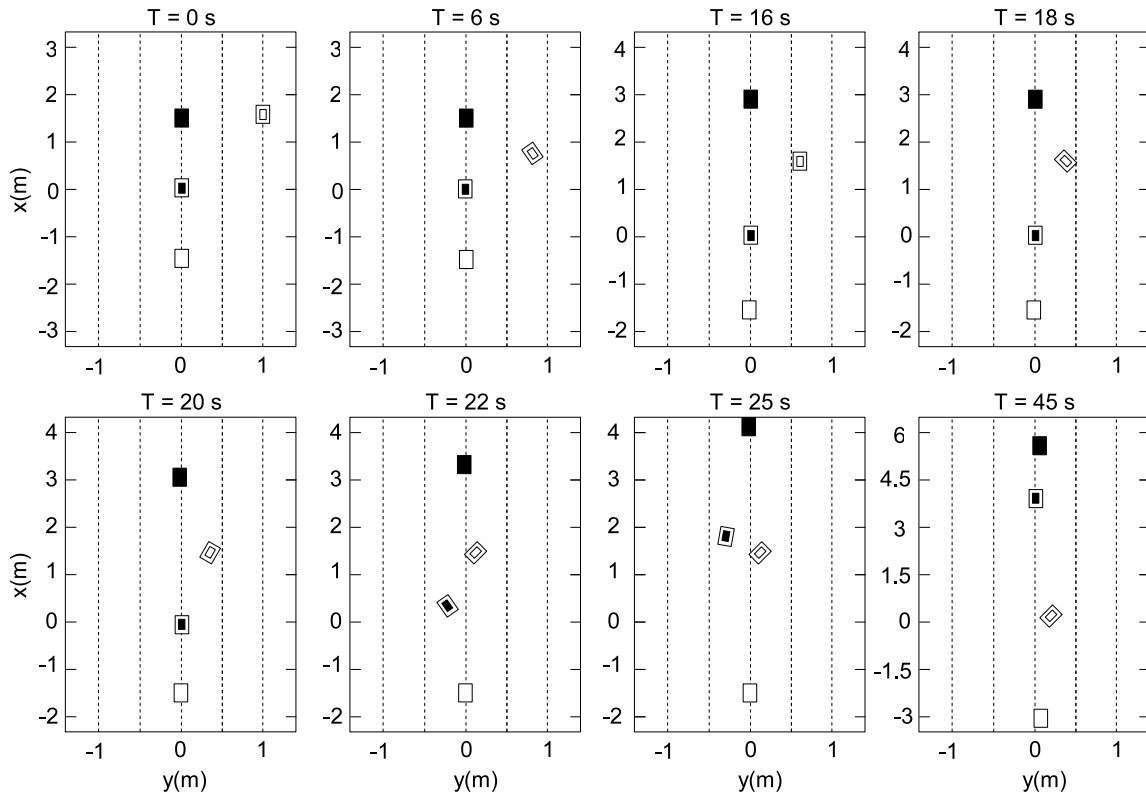


Figure 6.15 Mouvement des véhicules dans le test de collision sur le véhicule réalisant une insertion.

6.2.8 Collision sur le véhicule réalisant un retrait

Ce test implique la simulation d'une collision sur un véhicule quittant le train. Le comportement attendu des véhicules est identique aux règles directrices régissant la réponse aux collisions. Le meneur parcourt une distance de 3 mètres avant de s'immobiliser, le véhicule en amont de la collision évite d'urgence le véhicule accidenté pour reformer ensuite le train, et les véhicules qui sont à plus d'un véhicule de l'endroit de la collision s'immobilisent d'urgence dès la réception du message de collision. Les tableaux B.16 et B.17 présentent les messages échangés et les variations aux modèles des véhicules. La figure 6.16 illustre le mouvement des véhicules au cours du test. La seconde 10.34 annonce le début du retrait, la collision survient à la seconde 15.46. Véronica effectue la manœuvre d'urgence et reforme le train derrière Jason. Ce dernier s'immobilise à la seconde 39.67 après s'être distancé de l'endroit de la collision. Finalement, Lolitta s'est immobilisée à la seconde 16.65 sur réception du message de collision.

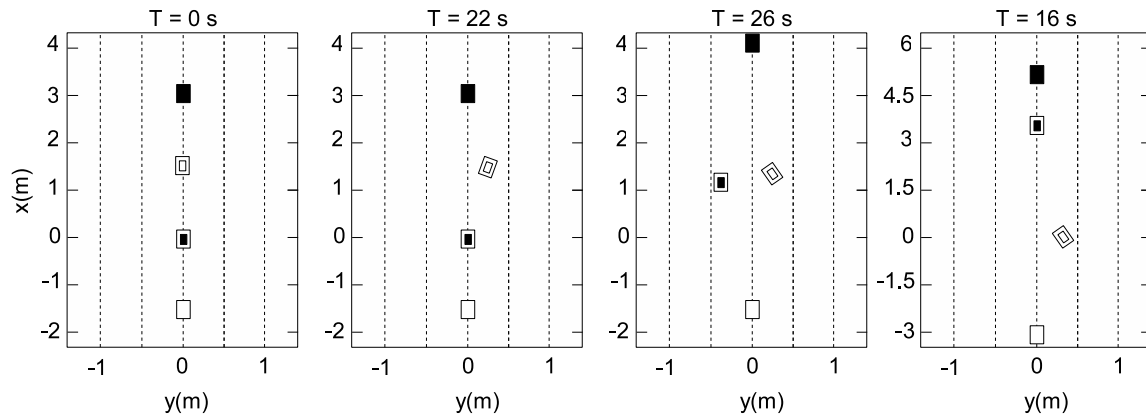


Figure 6.16 Mouvement des véhicules dans le test de collision sur le véhicule réalisant un retrait.

Onze essais furent nécessaires pour valider cette expérimentation. Le seul échec est attribuable à un non-respect des seuils fixés qui déterminent le côté choisi par le véhicule exploitant le comportement *Manœuvre d'urgence* pour contourner le véhicule accidenté. Si le véhicule subissant une collision est suffisamment sur la droite du véhicule qui le suit, le véhicule tente d'éviter d'entrer en collision avec le véhicule en le contournant par la gauche. Dans les autres cas, le véhicule privilégie de contourner par la droite. L'échec obtenu dans un des essais est dû aux estimations de LAMP où Anita, qui subissait la collision, avait entamé son retrait du train et se situait à la droite de Véronica. Cependant, Véronica percevait Anita directement devant elle et elle a tenté de l'éviter en la contournant vers la droite au lieu de la gauche. En contournant vers la droite, Véronica est entrée en collision

avec Anita. L'accident produit démontre une fois de plus l'importance d'avoir des capteurs fiables afin de garantir la sécurité des utilisateurs du système.

6.3 Opération lors d'une situation d'urgence

Cette section présente les tests réalisés lors d'une situation d'urgence. Un total de sept scénarios ont été couverts. Le premier consiste à éviter un obstacle qui se situe sur la trajectoire désirée du train de véhicule. Les six autres valident les décisions réalisées par les véhicules lorsqu'un véhicule connaît une défaillance au niveau de son capteur de positionnement. Lors de cette défaillance, le véhicule quitte impérativement le train de véhicule en effectuant une sortie d'urgence. Tout comme les tests impliquant une collision d'un véhicule où la collision est émulée, la défaillance des capteurs est également émulée. Concrètement, l'ordinateur de contrôle active l'entrée *simulerDefaillance* du comportement *Sortir d'urgence* pour commander la sortie d'urgence.

6.3.1 Signalement d'obstacle par le meneur

La présence d'un obstacle sur l'infrastructure routière représente un danger pour le bon fonctionnement du train de véhicule. La communication entre les véhicules est utilisée pour faciliter l'évitement d'obstacles. Lorsqu'il détecte un obstacle, un véhicule propage vers l'arrière du train la présence de l'obstacle. Ainsi, les véhicules en amont sont informés de la présence de l'obstacle bien avant que leurs propres capteurs détectent l'obstacle en question.

Pour cette expérimentation, une boîte de carton a été placée sur la trajectoire du train de véhicules. Le meneur, qui est muni d'un laser permettant la détection des obstacles, détecte la boîte de carton et relaie l'information à son suiveur immédiat, qui relaie à son tour le message. Lors de la réception du message, les véhicules ajoutent un décalage sur la distance latérale de suivi désirée avec leur meneur. Ce décalage cause une importante erreur dans le comportement de suivi de véhicule et le comportement réagit en braquant dans la direction permettant d'éviter l'obstacle. Cette direction est contenue dans le message signalant l'obstacle envoyé par le meneur. Le tableau 6.8 présente l'échange des messages aux seins de l'expérimentation.

Le meneur détecte la boîte de carton à la seconde 11.14 et communique à Veronica la présence de cet obstacle en spécifiant de l'éviter par la gauche. Veronica propage le message vers l'arrière du train. La figure 6.17 illustre l'application du décalage de 600 mm et la

figure 6.18 illustre le virage vers la gauche des véhicules qui est identifiable par l'augmentation de l'orientation des véhicules à partir de la seconde 11.14. À la seconde 15.81, le meneur a évité l'obstacle et propage l'information vers l'arrière du train. Le décalage n'est plus appliqué et le suivi de véhicule reprend normalement. Le décalage s'est donc appliqué pendant 4.67 sec, ce qui a permis aux véhicules de changer de voie et d'éviter l'obstacle.

L'obtention des 10 essais nécessaires pour valider l'expérimentation s'est effectuée en 12 tentatives. Les deux expériences échouées sont dues à l'imprécision du système de positionnement relatif. En effet, les véhicules n'ont pas réalisé leur changement de voie adéquatement, alors que le capteur leur indiquait que si. Dans chacun des échecs, un véhicule membre du train est entré en collision avec la boîte servant d'obstacle à éviter.

Tableau 6.8 Messages échangés dans le test d'évitement d'obstacle ou changement de voie distribué

T(s)	Jason	Veronica	Anita	Lolitta
0.08	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>
11.14	Obstacle (gauche)	<i>Obstacle (gauche)</i>		
11.15		Obstacle (gauche)	<i>Obstacle (gauche)</i>	
11.16			Obstacle (gauche)	<i>Obstacle (gauche)</i>
15.81	Obstacle (aucun)	<i>Obstacle (aucun)</i>		
15.82		Obstacle (aucun)	<i>Obstacle (aucun)</i>	
15.83			Obstacle (aucun)	<i>Obstacle (aucun)</i>
46.34	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>	<i>Arret</i>

6.3.2 Sortie d'urgence d'un membre

Ce premier test sur les sorties d'urgence débute avec un train de véhicules formé de Jason, d'Anita, de Véronica et de Lolitta. Après une dizaine de secondes (voir tableaux B.18 et B.19), la simulation de défaillance a lieu. Anita exploite le comportement *Sortie d'urgence* (T=10.33 s) et signale son état à son meneur Jason et à son suiveur Véronica. Ces derniers collaborent à la sortie d'urgence comme s'il s'agissait d'un retrait. La particularité de la manœuvre est qu'Anita effectue son retrait en se fiant uniquement à ses sonars puisque son système de positionnement relatif est non fonctionnel. À la seconde 15.18, Anita passe à l'état *Autonome* puisqu'elle a achevé son retrait. Jason et Véronica reviennent à l'état *Meneur* et *Membre* respectivement. Véronica, qui suivait Jason à une distance de 3 m pendant le retrait, reforme le train en suivant Jason à une distance de 1.5 m. La figure 6.19 illustre l'ensemble de ces étapes clés.

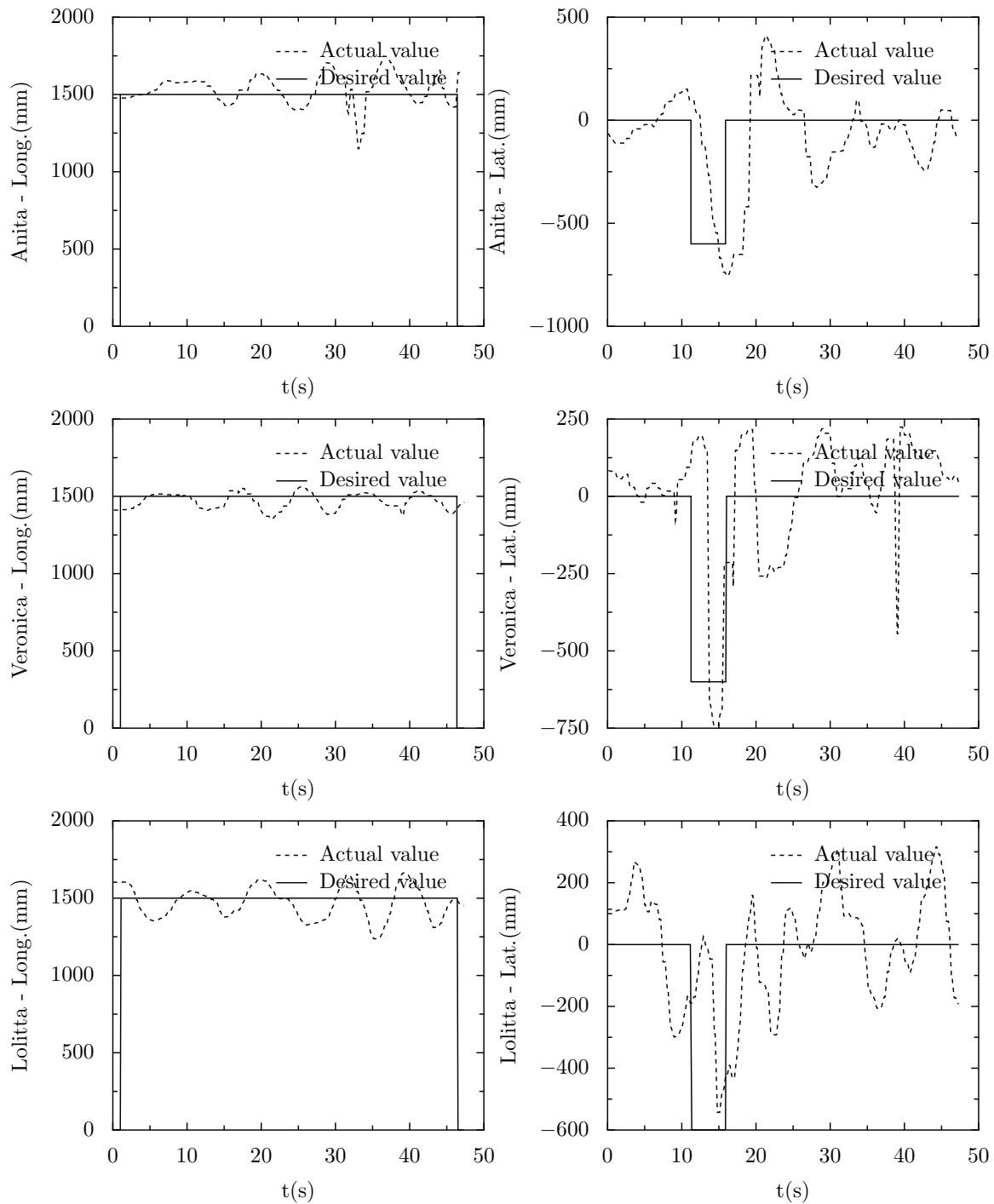


Figure 6.17 Suivi de véhicule pendant le test d'évitement d'obstacle ou changement de voie distribué

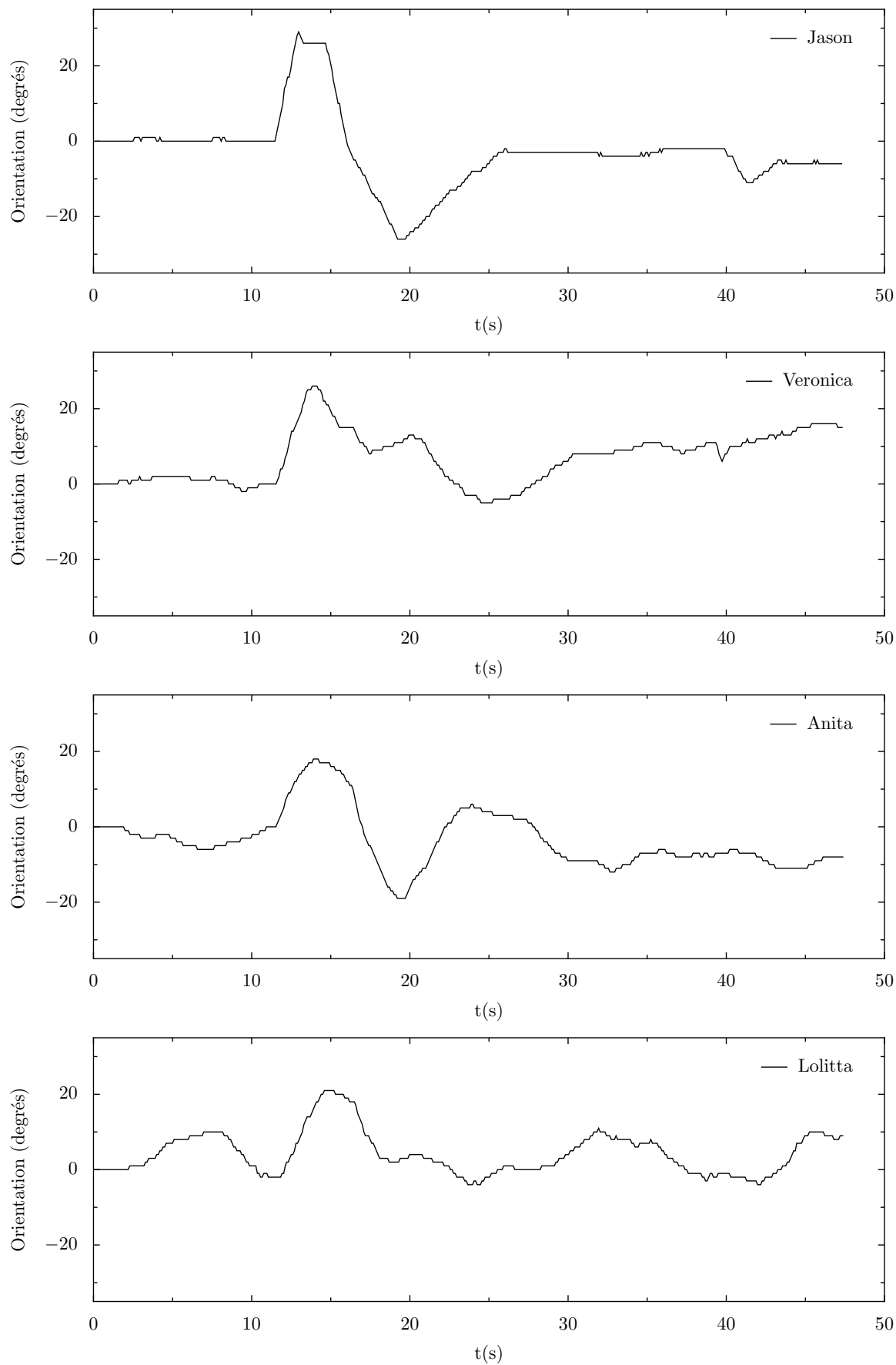


Figure 6.18 Orientation des véhicules pendant le test d'évitement d'obstacle ou changement de voie distribué

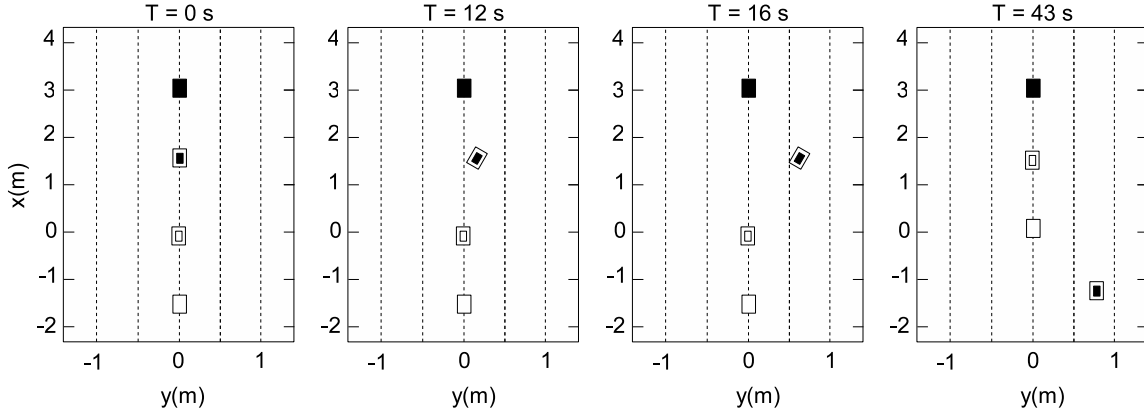


Figure 6.19 Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre.

Pour obtenir dix essais réussis, douze essais furent nécessaires. Le premier échec est survenu à la fin d'une expérimentation quand les sonars n'ont pas été en mesure de fournir de bonnes estimations sur la proximité du mur. Anita a pris une tangente d'environ 45 degrés avec le mur et a traversé le corridor sur sa largeur. Ce mouvement est semblable à un changement de voie et invalide le test, même s'il s'est produit à la toute fin de l'expérimentation. Le deuxième échec est attribuable au système de positionnement LAMP qui n'a pas permis à Lolitta de suivre Véronica au cours de l'expérimentation. En effet, Lolitta a mal estimé la position de Véronica au moment où elle passait à côté d'Anita qui était en conduite autonome dans la voie de droite. Lolitta a modifié sa trajectoire drastiquement et est entrée en collision avec Anita.

6.3.3 Sortie d'urgence d'un membre en aval d'une insertion

Au départ de ce test, un train de véhicules formé de Jason, Véronica et Lolitta est placé dans la voie de gauche. Anita est placée dans la voie de droite et amorce l'expérience en conduite autonome. La figure 6.20, les tableaux B.20 et B.21 illustrent la progression du test. À la seconde 20.12, Anita détecte Véronica comme meneur potentiel et Lolitta comme suiveur potentiel. À cet instant, l'ordinateur de contrôle commande l'insertion d'Anita qui demande les autorisations nécessaires pour s'insérer et passe à l'état *Approche*. Environ 3 secondes après le début de l'insertion ($T=34.80$ s), une défaillance est simulée sur Veronica qui exploite le comportement *Sortir d'urgence*. Elle avertit Jason, Lolitta et Anita de son état et quitte le train d'urgence.

Dans une situation d'urgence comme celle-ci, les règles de conduite partagées par l'ensemble des véhicules sont les suivantes. La sortie d'urgence du véhicule membre du train

est prioritaire et les véhicules restant dans le train doivent coordonner leurs déplacements en conséquence. Le véhicule réalisant l'insertion abandonne sa manœuvre et effectue également une sortie d'urgence. Ce comportement est jugé sécuritaire puisqu'il est garanti que la voie de droite est libre puisque le véhicule vient de la quitter en réalisant son insertion.

Ainsi, à la seconde 34.87, Anita passe à l'état *Sortie d'urgence* et n'a plus aucune collaboration avec les membres du train. Pour leurs parts, Jason et Lolitta collaborent à la sortie d'urgence Véronica. Après le retrait de Véronica, Lolitta rejoint Jason pour reformer un train de deux véhicules jusqu'à la fin de l'expérimentation.

Un total de treize essais ont été nécessaires pour ce test. Les trois échecs sont dus à des erreurs d'estimation des sonars lors de l'exploitation du comportement de conduite autonome sur Anita ou Véronica une fois les manœuvres de sortie d'urgence complétées.

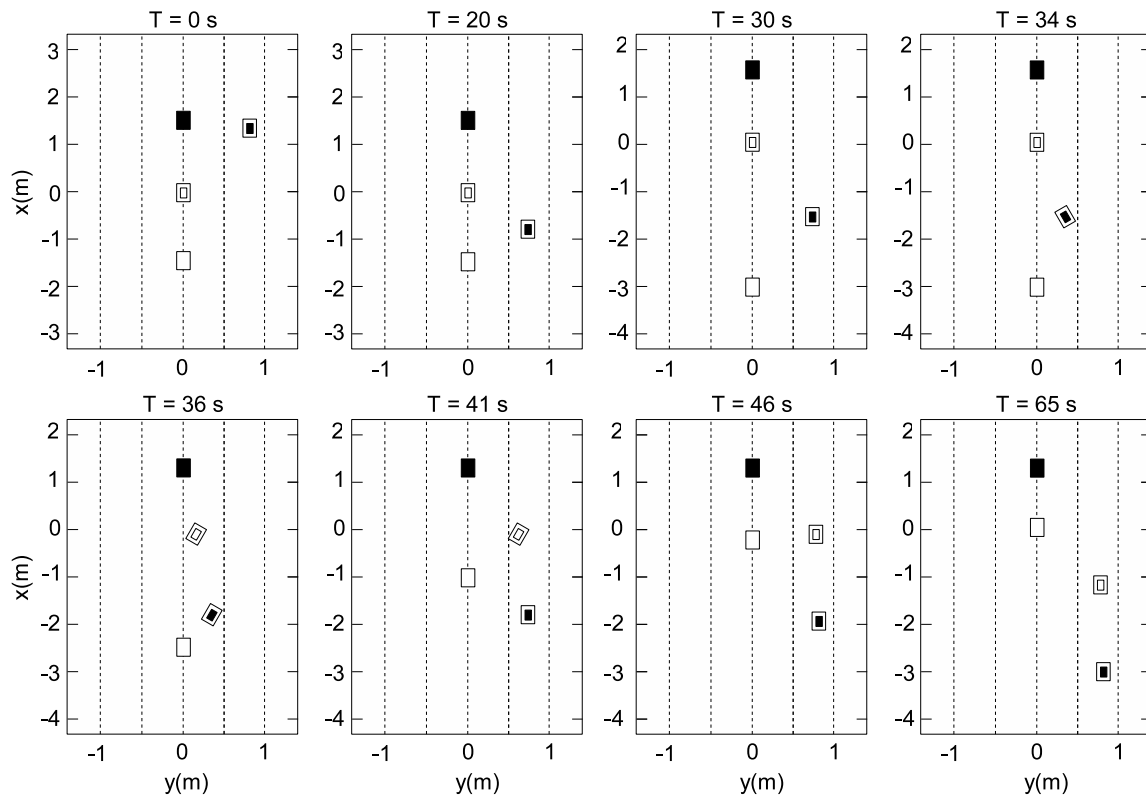


Figure 6.20 Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'une insertion.

6.3.4 Sortie d'urgence d'un membre en amont d'une insertion

Dans ce test, un train de véhicules composé de Jason, Anita et Lolitta se situe dans la voie de gauche. Véronica est dans la voie de droite en conduite autonome. La figure 6.21,

les tableaux B.22 et B.23 illustrent la progression du test. Véronica s'insère derrière Jason à partir de la seconde 27.92. Environ trois secondes plus tard, Anita, qui collabore à l'insertion de Véronica, détecte une défaillance de son capteur de positionnement et informe tous les véhicules ($T=30.25$ s). Elle exécute une sortie d'urgence tout comme Véronica qui annule son insertion. Véronica et Anita redeviennent en conduite autonome à la seconde 36.57 et 38.25 respectivement. À partir de la seconde 38.25, Lolitta rejoint Jason pour le suivre à une distance de 1.5 m. Le test se termine à la seconde 55.30.

Deux échecs ont été observés pendant l'exécution de ce test. Lors du premier échec, Anita n'a pas été en mesure de rester parallèle au mur une fois sa sortie d'urgence complétée. Les sonars sont une fois de plus en cause pour expliquer cet échec. Le deuxième échec est dû au système de positionnement LAMP. En conduite autonome, Véronica n'a jamais détecté Jason comme meneur potentiel. L'insertion n'a donc jamais été commandée et le scénario de test fut interrompu.

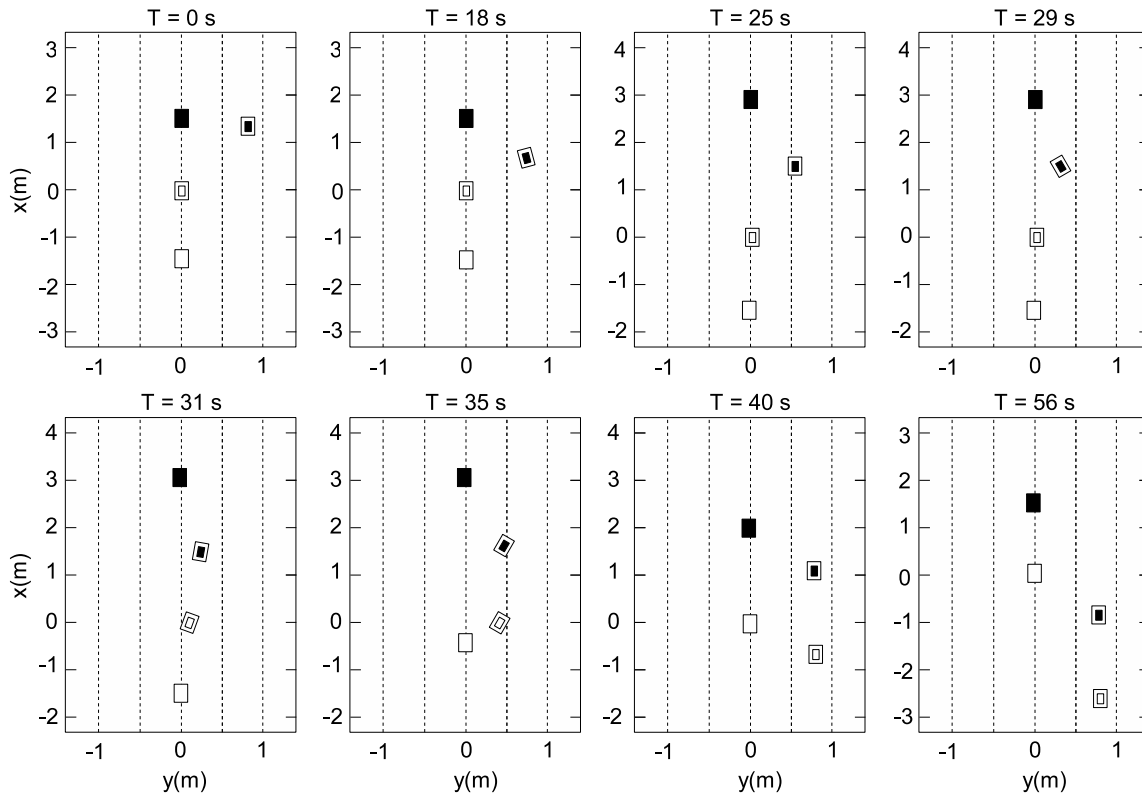


Figure 6.21 Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'une insertion.

6.3.5 Sortie d'urgence d'un membre en aval d'un retrait

Pour ce test, un train de quatre véhicules se trouve dans la voie de gauche. Une demande de retrait est commandée, suivi de peu par la simulation d'une défaillance le véhicule situé devant celui réalisant le retrait. La figure 6.22 et les tableaux B.24 et B.25 illustrent la progression du test.

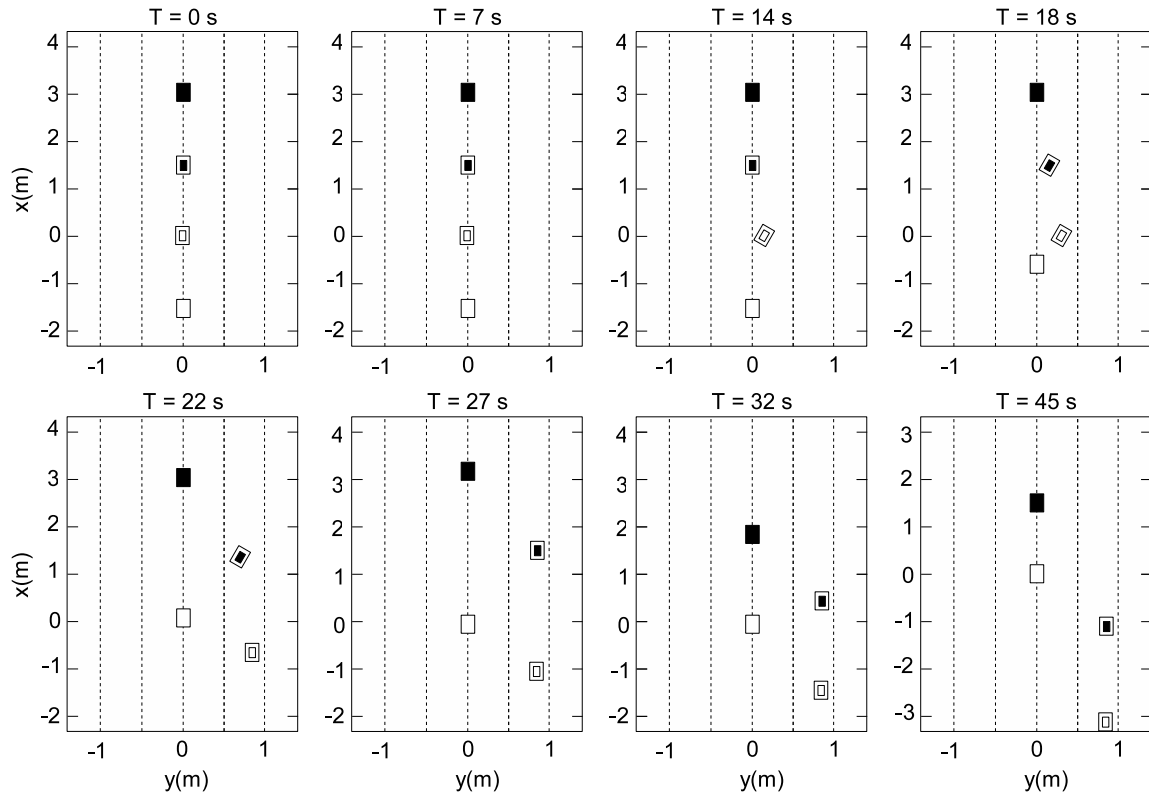


Figure 6.22 Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'un retrait.

Lorsque la défaillance est simulée ($T=15.32$ s), Véronica exploite le comportement *Sortir d'urgence*. De plus, elle signale aux autres véhicules son intention de quitter d'urgence le train. Anita continue son retrait, mais elle l'effectue en sortie d'urgence de façon autonome. Pour leurs parts, Jason et Lolitta collaborent à la sortie d'urgence de Véronica ($T=15.39$ s). Une fois le retrait de Véronica réalisé ($T=23.04$ s), Lolitta rejoint Jason et l'expérimentation se termine une fois la distance désirée de suivi de 1.5 m est maintenue ($T=45.55$ s).

Un total de treize essais ont été effectués pour en obtenir dix de valides. Un échec est attribuable à Anita qui a effectué un changement de voie non autorisé à cause de mauvaises estimations des sonars à la fin d'une expérimentation. Les deux autres échecs sont attri-

buables à LAMP qui n'a pas permis à Lolitta d'estimer la position de son meneur Jason entre le moment de la collaboration au retrait à Véronica et la fin de l'expérimentation.

6.3.6 Sortie d'urgence d'un membre en amont d'un retrait

Dans ce test, une défaillance du capteur de positionnement est simulée sur un véhicule situé en amont d'un véhicule exécutant une manœuvre de retrait. La progression du test est similaire à celle du test précédent tel que l'illustre la figure 6.23 et les tableaux B.26 et B.27. D'abord, le test s'amorce avec un train de quatre véhicules composé de Jason, Véronica, Anita et Lolitta. À la seconde 11.51, Véronica effectue un retrait du train. Jason et Anita collaborent à ce retrait jusqu'au moment où une défaillance est simulée sur Anita. Elle avertit les autres véhicules et effectue une sortie d'urgence. Jason devient le nouveau meneur de Lolitta et ces derniers collaborent à la sortie d'urgence d'Anita. Pour sa part, Véronica complète son retrait en transitionnant à l'état *Sortie d'urgence*. Le test se termine à la seconde 45.29 une fois que Lolitta a rejoint Jason à la distance de suivi désirée de 1.5 m.

Au total, seize essais ont été nécessaires pour en obtenir dix de valides. Les causes des échecs sont les mêmes que pour les tests précédents. Quatre échecs sont dus à l'incapacité des véhicules en conduite autonome de rester dans la voie de droite après avoir réalisé la sortie d'urgence. Les deux autres échecs sont dus au système LAMP qui n'a pas permis à Lolitta de rejoindre Jason après le retrait d'Anita du train de véhicules.

6.3.7 Sortie d'urgence du véhicule de manœuvre pendant une insertion

Ce test consiste à simuler une défaillance du capteur de positionnement d'un véhicule s'insérant dans le train de véhicules. La figure 6.24 et les tableaux B.28 et B.29 illustrent la progression du test. Véronica passe de l'état *Approche* à l'état *Insertion* à la seconde 22.22. Jason et Anita collaborent avec elle pour lui donner l'espace nécessaire pour s'insérer. À la seconde 24.43, Véronica détecte la défaillance simulée de son capteur de positionnement et amorce une sortie d'urgence. Jason et Anita collaborent à cette manœuvre en transitionnant de l'état *Collaboration à une insertion* à *Collaboration à un retrait*. Le test se termine à la seconde 49.61 quand le train de trois véhicules est en régime permanent et que Véronica est redevenue en conduite autonome suit à sa sortie d'urgence.

Pour obtenir les dix essais requis, onze tentatives ont été nécessaires. L'échec est attribuable au système LAMP qui n'a pas été en mesure de détecter que Jason était un meneur

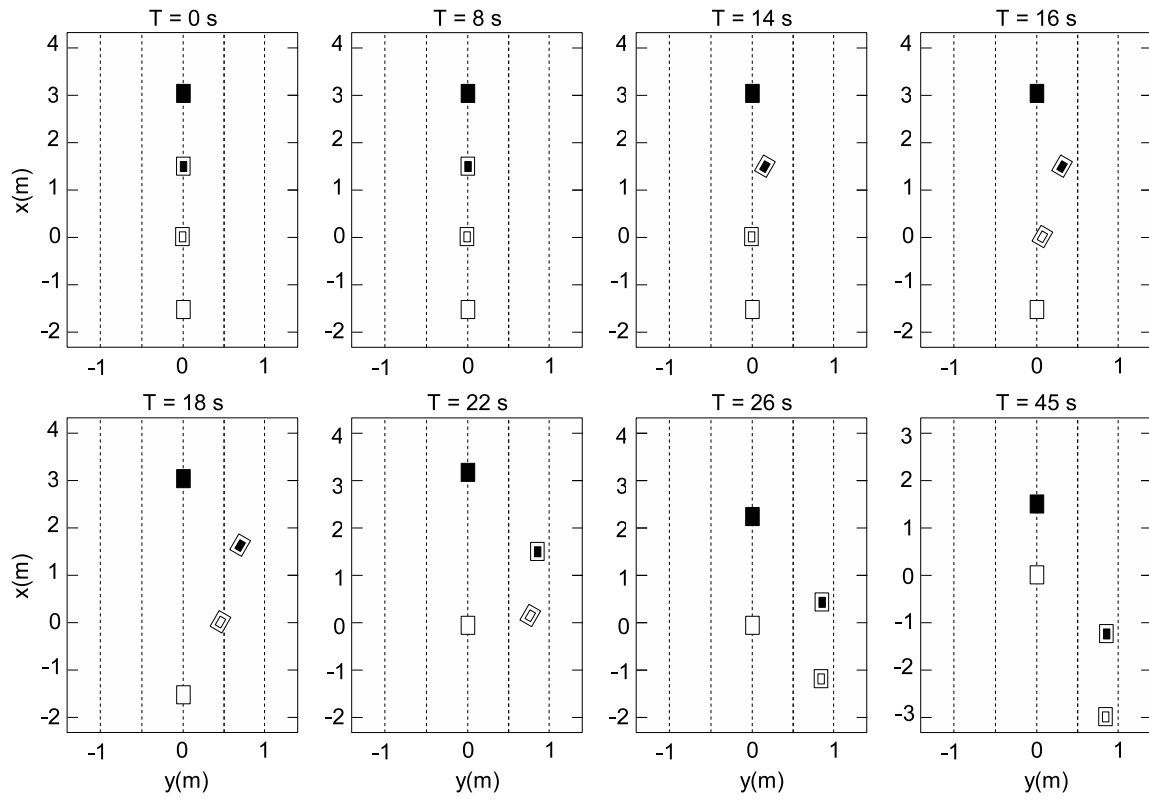


Figure 6.23 Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'un retrait.

potentiel pour Véronica lorsqu'il a passé à ses côtés. L'insertion n'a jamais été effectuée et le test fut interrompu.

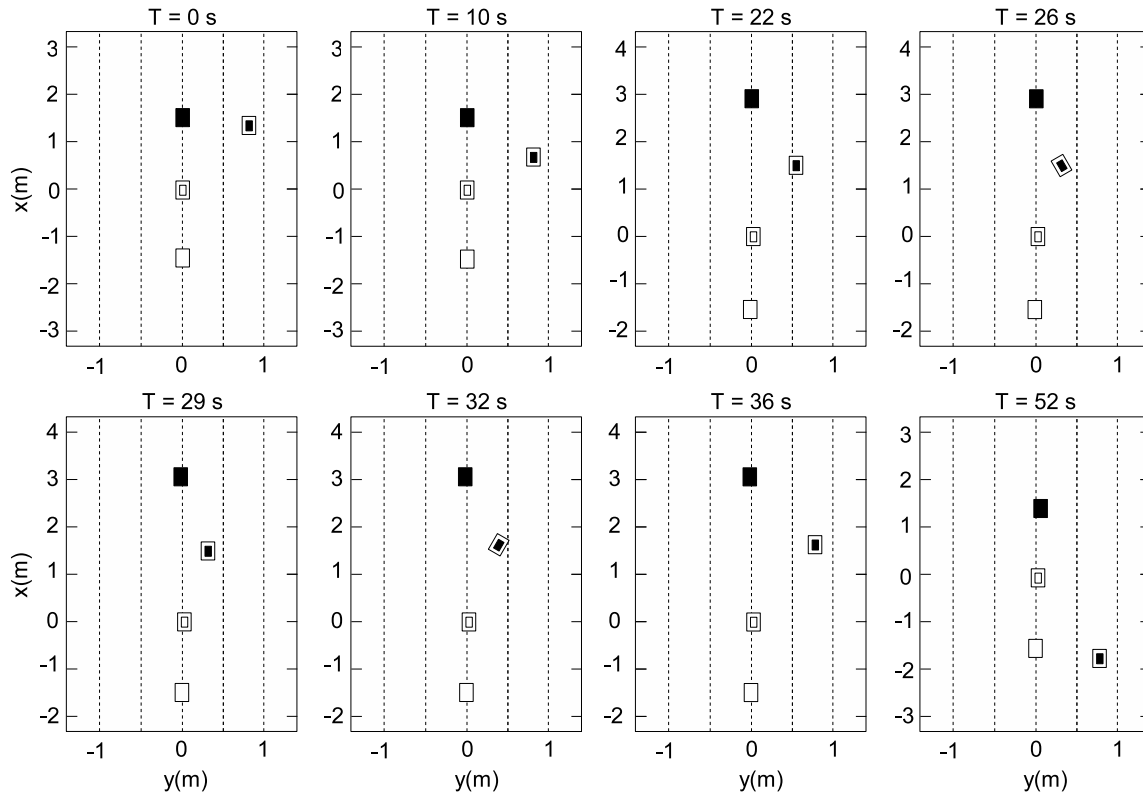


Figure 6.24 Mouvement des véhicules dans le test de sortie d'urgence du véhicule de manœuvre pendant une insertion.

6.4 Synthèse des résultats

Cette section présente des observations communes à l'ensemble des tests réalisés et critique la robustesse de l'architecture. Avec un taux de réussite de 100 %, 180 essais sont nécessaires pour réaliser 10 essais de chacune des expérimentations. Au total, 214 essais ont été réalisés pour en obtenir 180 de valides. Le taux de succès de l'architecture se situe donc autour de 85 %. Les 34 échecs observés sont dus à trois causes distinctes : les sonars, le système LAMP et le système de navigation à l'estimé. En aucun cas, les échecs furent causés par la prise de décision distribuée.

Il a été préalablement établi que les sonars n'ont pas pu être utilisés pour réaliser la détection d'obstacles dans l'environnement. Cependant, les sonars sont utilisés pour les sorties d'urgence et pour réaliser la conduite autonome quand le véhicule est un agent libre. Les comportements exploités dans ces situations sont basés sur un algorithme de

suivi de mur. L'algorithme identifie les murs à l'aide des sonars et tente de conserver une distance constante parallèlement au mur. À l'occasion, le comportement cafouille et cesse de se diriger parallèlement au mur en adoptant une tangente qui l'oriente vers le centre du corridor. Ce déplacement de la part du véhicule équivaut pratiquement à un changement de voie, ce qui invalide le test. Cette situation survient quand de fausses estimations de la distance séparant le véhicule du mur sont fournies par les sonars pour une durée prolongée. Généralement, les fausses estimations ne sont qu'instantanées et n'affectent pas le comportement général du véhicule. Cependant, dans 12 cas, ces fausses détections ont été importantes et l'algorithme de suivi de mur n'a pu répondre correctement.

La section 5.3 introduit les problèmes de performances du système LAMP. Ces problèmes de performances constituent les raisons principales qui expliquent l'échec de l'architecture à réaliser certains tests. Au total, 20 échecs sont attribuables au système LAMP. Cette proportion représente plus de 58 % des mauvais fonctionnements de l'architecture. Parmi ces échecs, 12 sont attribuables à l'incapacité du comportement de suivi de véhicule de suivre son meneur, et huit sont attribuables à la disparition d'un véhicule du train de véhicules. Cependant, considérant que le capteur est un prototype, il a été en mesure de remplir son mandat pour valider l'architecture et le fait que de connaître simplement la position relative des véhicules dans l'environnement permettait de coordonner les déplacements des véhicules dans les trains de véhicules.

Finalement, les deux autres échecs ont été causés par le système de navigation à l'estime des véhicules. Lors de la sortie d'urgence d'un véhicule, la navigation à l'estime est utilisée pour détecter si le véhicule a quitté le train de véhicule. Ce système a fait défaut deux fois à cause d'une dérive trop importante de l'estimation de l'orientation du véhicule.

Bien que des filtres et des ajustements divers ont été réalisés sur les différents comportements et sur le *Gestionnaire des positions*, il n'a pas été possible de se prémunir complètement des fausses détections des capteurs. Le filtrage et le traitement numérique des signaux sont des champs de recherche en soit et ne constituent pas l'objectif de cette recherche. Ainsi, il est juste de conclure que les algorithmes de traitements des capteurs ne sont pas optimaux, mais cela n'invalide en rien les fonctionnalités de l'architecture au niveau du flux des informations et de la structure des composants constituant l'architecture.

En effet, au niveau de la coordination des intentions et de la prise de décision, la totalité des essais s'est effectuée selon les spécifications et contraintes apposées au système. Aucun des échecs n'est attribuable à une mauvaise prise de décision. Dans la mesure où la couche délibérative reçoit les stimuli, elle prend la décision prévue pour assurer la coordination

des véhicules. Cependant, l'application de cette décision est plus difficile au niveau comportemental, car les imprécisions des capteurs ont un impact majeur sur les algorithmes utilisés dans les comportements.

CHAPITRE 7

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'objectif principale de l'étude visait à mettre en place une architectures décisionnelle complète avec communication bidirectionnelle pour la prise de décision distribuée d'un groupe de véhicules exécutant l'ensemble des manœuvres de train de véhicules. Le travail réalisé pour faire de cette étude un succès a permis de déterminer l'ensemble des éléments qui permettent de mettre l'architecture en perspective. L'architecture DCD a été testé dans un grand nombre de scénarios susceptibles de se produire au sein des trains de véhicules. La somme des tests a permis d'accumuler un large éventail de données qui permettent de valider le bon fonctionnement de l'architecture dans tous les cas de figure défini lors de l'établissement des requis. L'utilisation d'une architecture hybride unissant une couche délibérative et une couche comportementale est hors de tout doute une approche valable pour réaliser la coordination des véhicules au seins de l'approche novatrice d'AUTO21 concernant les trains de véhicules.

L'analyse des résultats a permis d'établir que la couche délibérative est déterministe, c'est-à-dire qu'elle réagit toujours de la même façon aux stimuli injectés en entrée. Les résultats indiquent également que le protocole de communication bidirectionnelle a permis d'expliquer les intentions des véhicules afin d'éliminer tout risque d'ambiguïté dans l'ensemble de l'architecture. En tout temps, les véhicules connaissent l'état exact dans lequel se trouvait les véhicules à proximité, ce qui permet à chaque véhicule de prendre une décision cohérente et coordonnée à l'échelle du train de véhicules. Cette synchronisation des états est possible uniquement parce que le train de véhicules n'accepte qu'une seule manœuvre d'insertion ou de retrait à la fois. La stratégie de communication utilisée visait à minimiser les échanges de messages. Lors de la réception d'un message, un véhicule est en mesure d'inférer la portée de ce message à l'aide les règles de conduites qui sont partagées par l'ensemble des véhicules. Cette approche s'est montrée robuste puisqu'aucun des 34 échecs sur 214 essais n'est relié à la communication entre les véhicules.

Les défaillances observées durant les expérimentations sont dûes à des problèmes chroniques reliés aux capteurs équipant les robots mobiles. Ces problèmes sont surtout présents sur le système de positionnement LAMP dont le rôle est de fournir la position relative des véhicules dans l'environnement. Étant donné que le comportement de suivi de véhicule est le comportement utilisé la majeure partie du temps, les mauvaises performances de

LAMP ont grandement affecté les performances et la qualité des déplacements. La faiblesse du capteur a mené à l'introduction de gains et de seuils plus permissifs sur les différents comportements, occasionnant des temps de réaction des véhicules plus lents que ce qui était possible d'obtenir des véhicules. De plus, dans bon nombre d'occasions, le capteur a complètement échoué à estimer convenablement la position des véhicules, et certaines expérimentations se sont traduites par des échecs. La deuxième source principale de défaillances se situe au niveau des sonars. Un total de 12 échecs sur 214 essais relié à ce capteur a été enregistré pendant les tests.

Évidemment, une architecture décisionnelle se doit d'être robuste aux défaillances des capteurs utilisés. Dans le contexte de cette étude, l'emphasis était mise au niveau de la prise de décision et au niveau de la coordination par la communication entre les véhicules. Des filtres et des algorithmes ont été mis en place afin de limiter l'impact des mauvaises estimations des capteurs, ce qui a permis d'atteindre le pourcentage de réussite de 84%. Cette proportion est jugée excellente dans les conditions et valide également le succès des expérimentations et de l'architecture DCD. Évidemment, il est envisageable d'améliorer le taux de réussite en améliorant les capteurs et le traitement effectué sur les signaux produits par ceux-ci. LAMP est un prototype de capteur et la gestion des erreurs doit être améliorée afin de lui apporter une plus grande robustesse et de meilleurs algorithmes de traitement de signaux. Il est généralement admis que la robustesse d'une plateforme de capteurs peut être atteinte en utilisant des informations redondantes pour réaliser une estimation. Dans le cas de cette étude, le capteur LAMP est central et le contrôle des véhicules s'effectue exclusivement avec les données produites par ce système. L'utilisation de laser, de centrale inertielle, de caméra vidéo pourrait compléter le système LAMP afin d'améliorer la qualité du positionnement relatif des véhicules et améliorer les comportements d'évitement de collision et de navigation autonome. Mettre en place une plateforme de capteurs aussi sophistiqué est un défi de taille et était hors de la portée de cette étude.

Malgré les excellents résultats obtenus avec les mécanismes de prise de décision, plusieurs éléments peuvent être critiqués et améliorés. Ces éléments bousculent certaines règles de conception réalisées dans le développement de l'architecture. La première règle à réévaluer concerne la décision de ne pas injecter comme entrée à la couche délibérative la position relative des véhicules dans l'environnement. Rappelons que seule la couche comportementale connaît la position des véhicules dans l'environnement, et cette dernière est responsable d'exécuter la manœuvre commandée par la couche délibérative. La couche délibérative raisonne en fonction de la configuration souhaitée du train de véhicules, mais n'accède pas

directement aux données de positionnement. Dans le scénario de test *Insertion et collision en aval*, le véhicule qui s'insère dans le train complète systématiquement son insertion lorsqu'un véhicule en aval connaît une défaillance. Le meneur et le suiveur potentiel de ce véhicule de manœuvre savent systématiquement que le véhicule terminera son insertion et s'adaptent en conséquence. Dans l'éventualité où la collision survient quand la collision se produit peu de temps après le début de son insertion, il aurait avantage à effectuer une sortie d'urgence puisque c'est la manœuvre qui s'exécuterait le plus rapidement et de façon plus sécuritaire dans ce contexte. Toutefois, si le véhicule est proche du train et qu'il a pratiquement complété son insertion, il a avantage à la terminer et à réagir à la situation d'urgence comme un membre du train. Afin d'éliminer tout risque de désynchronisation dans les états des véhicules et ne pas dépendre sur l'exactitude des estimations de positionnement, le véhicule réalisant l'insertion devrait communiquer sa décision de poursuivre ou d'interrompre son insertion à son meneur et suiveur potentiel selon le contexte. De cette façon, ces derniers seront en mesure de répondre adéquatement en réaction à la décision du véhicule. Pour réaliser cette décision et envoyer les messages associés, la couche délibératrice doit connaître la configuration du train de véhicules puisque le raisonnement s'effectue sur la distance relative par rapport aux véhicules membres du train. Cette information est obtenue en analysant le positionnement des véhicules en fonction de l'état courant du véhicule. Cette analyse peut être réalisée uniquement par la couche délibératrice, qui est la seule à connaître l'état du véhicule. Mentionnons qu'une décision semblable pourrait également être réalisée dans le scénario de test *Retrait et collision en aval* où le véhicule pourrait décider de réintroduire le train en annulant sa manœuvre de retrait s'il est encore très proche de sa position lorsqu'il était membre du train. Dans l'éventualité où le véhicule posséderait la distance de freinage nécessaire pour s'immobiliser, il pourrait exécuter un arrêt d'urgence.

Une deuxième décision réalisée dans l'implémentation de l'architecture qui peut être remise en question concerne l'utilisation d'une machine à états finis pour réaliser la prise de décision. Dans l'environnement contrôlé de l'Université de Sherbrooke et en fonction des requis établis pour le projet, la machine à états finis s'est avérée un bon choix technique pour implémenter l'architecture. Cependant, la quantité d'états et la quantité de transitions approchent une masse critique qui devient de plus en plus difficile à maintenir et à étendre. Ajouter des nouvelles manœuvres tels la fusion ou la cission de train pourrait s'avérer difficile. Supporter les manœuvres multiples au sein du train de véhicules complexifierait également la machine à états finis. Lors de l'ajout d'un état, l'ensemble des transitions de cet état vers les états déjà existants doit être établi et vice versa. Bien que c'est théoriquement envisageable d'étendre une machine à états finis, les efforts pour

réussir à tester et implémenter des machines à états de grande taille sont très importants. D'autres architectures s'avèrent plus extensibles et permettent de bâtir de façon incrémentale les fonctionnalités désirées d'un système. Un exemple d'architecture plus extensible est la *Motivated Behavioral Architecture* [Beaudry *et al.*, 2005]. Cette architecture implémente un espace de travail commun qui sert de mémoire globale pour sauvegarder les données essentielles à la prise de décision. Des spécialistes accèdent et modifient l'espace de travail afin de proposer une solution au problème à résoudre. Concrètement, des spécialistes pourraient être utilisés pour représenter chacun des états de la machine à états finis de DCD. Ces spécialistes auraient la tâche de choisir quelle manœuvre exécuter et de configurer la manœuvre afin de tenir en compte la position relative des véhicules et d'autres paramètres. L'extensibilité de ce type d'architecture est plus grande qu'une machine à états finis. Précisons que dans le contexte de l'étude, l'utilisation d'une machine à états finis est adaptée vu la nature contrôlée de l'environnement et les choix de conceptions réalisées au début de l'étude qui en limitent la portée. Cependant, la synthèse des développements amène l'auteur de l'étude à conclure que la taille de la machine à états finis rend l'ajout de fonctionnalité difficile et qu'il pourrait s'avérer ardu de poursuivre les recherches au niveau de la prise de décision avec cette technologie. Évidemment, si les améliorations souhaitées à l'architecture se situent au niveau comportemental, l'implémentation de l'architecture peut facilement être réutilisée. Cette réutilisation est donc envisageable sur les tracteurs agricoles développés à l'Université de la Saskatchewan en partenariat avec le projet DCD [Griffith, 2008]. La dynamique des tracteurs est différente de celle des robots mobiles et les comportements doivent être adaptés en ce sens, mais l'étendue des manœuvres à réaliser est la même.

Finalement, un point essentiel de l'étude concerne l'accent mis sur les mécanismes de prises de décision et sur la dissémination des informations que les véhicules doivent échanger à l'aide de la communication entre les véhicules. Cela contraste avec la quasi-totalité des études réalisées sur les trains de véhicules et les véhicules autonomes qui mettent l'emphasis sur les lois de commande bas niveau qui contrôlent les actionneurs des véhicules. De ces contrôleurs, bon nombre d'études portent sur la stabilité des contrôleurs au niveau du formalisme mathématique. Cet aspect de l'étude n'a pas été réalisé. La stabilité d'une couche comportementale n'est pas facile à déterminer vu la non-linéarité des exploitations entre les différents comportements. De plus, avec les oscillations importantes du système LAMP, les contrôleurs ont été ajustés pour ne pas réagir trop rapidement aux hautes fréquences. Cette réalité a orienté l'étude sur les requis de l'architecture permettant de structurer les différents composants logiciels utilisés dans un tout cohérent. La suite logique de l'étude consiste donc à revoir les comportements afin d'y incorporer des lois de contrôle

bas niveau qui satisfont les critères de stabilité de chaîne, de stabilité par rapport au trafic et de stabilité par rapport au meneur qui font office de références dans la littérature.

ANNEXE A

COMMUNICATION AU SEIN DE L'ARCHITECTURE

La communication entre les véhicules a pour objectif de véhiculer une information à un véhicule ou à l'expérimentateur. La communication de ces informations s'effectue à l'aide de dialogue. Chaque dialogue est une séquence ordonnée d'un ou de plusieurs messages échangés entre une référence et un ou plusieurs acteurs du système. Le concept de référence met l'accent sur la séquence de messages qui est localement nécessaire à un véhicule pour changer d'état. Ainsi, deux véhicules qui s'échangent des messages sont localement en train d'exécuter un dialogue différent. La synchronisation des messages permet la réussite des deux dialogues.

Cette annexe présente les relations unissant les messages, les dialogues et les transitions de la machine à états finis qui en découlent. Pour chaque dialogue du tableau 4.5, une description, les conditions d'applications, la séquence des messages ainsi que des notes explicatives sont fournies. Les conditions d'applications concernent l'état initiale (voir tableau 4.3) dans lequel chaque véhicule peut se trouver pour être sensible à l'exécution du dialogue.

Préalablement à la présentation des dialogues, les tableaux A.1 et A.2 synthétisent les messages échangés entre l'expérimentateur et les véhicules, ainsi qu'entre les véhicules.

Tableau A.1 Messages échangés entre les véhicules et l'expérimentateur

ID.	Message	Description	Paramètre
M1	Départ	Début de l'expérimentation	
M2	Arrêt	Fin de l'expérimentation	
M3	Insérer le train	Commande l'insertion d'un véhicule	Nom du meneur
M4	Quitter le train	Commande le retrait d'un véhicule	
M5	Meneur potentiel détecté	Un agent libre indique qu'il détecte un meneur potentiel	Meneur potentiel
M6	Début de l'insertion	Indication que l'insertion débute	

A.1 Départ

Le dialogue *Départ* permet d'amorcer une expérimentation en mettant les véhicules en mouvement. L'expérimentateur envoie le message *Départ* à tous les véhicules. Pour être sensible à ce dialogue, les véhicules doivent être dans l'état *Arrêt*. Les transitions à la machine à états finis sont les suivantes :

Tableau A.2 Messages échangés entre les véhicules

ID.	Message	Description	Paramètre
M7	Puis-je insérer le train ?	Demande l'autorisation pour s'insérer dans le train	Position
M8	L'espace pour l'insertion est disponible	Indication que l'espace nécessaire pour l'insertion est disponible	
M9	Puis-je quitter le train ?	Demande l'autorisation pour quitter le train	Véhicule remplaçant
M10	Je suis déjà en collaboration avec un autre véhicule	Refus d'un véhicule de collaborer à une manœuvre	
M11	Tu peux exécuter la manœuvre	Autorisation pour une manœuvre	Vitesse
M12	Manœuvre complétée	Manœuvre complétée avec succès	
M13	Manœuvre échouée	Échec de la manœuvre	
M14	Signalement d'obstacle	Signalement d'un obstacle à proximité	Emplacement
M15	Le véhicule quitte d'urgence	Un véhicule quitte d'urgence	Véhicule en sortie d'urgence et véhicule remplaçant
M16	Le véhicule arrête d'urgence	Un véhicule connaît une situation d'urgence	Véhicule en situation d'urgence et véhicule remplaçant
M17	Vitesse du train	Communication de la vitesse de déplacement du train	Vitesse
M18	Message invalide	Message par défaut utilisé lors d'une désynchronisation des communications	

- T1A pour le meneur du train ;
- T1B pour un véhicule membre du train ;
- T1C pour un agent libre.

A.2 Arrêt

Le dialogue *Arrêt* permet d'arrêter une expérimentation et d'immobiliser les véhicules. L'expérimentateur envoie le message *Arrêt* à tous les véhicules. Les véhicules sont toujours sensibles à ce dialogue et la transition T16 est effectuée.

A.3 Insertion

Le dialogue *Insertion* permet à l'expérimentateur de commander une manœuvre d'insertion de la part d'un véhicule. La référence de ce dialogue est le véhicule de manœuvre. Trois variantes dans la séquence des messages sont possibles : succès du dialogue, refus du meneur et refus du suiveur. La sous-figure A.1a présente la variante du succès. L'expérimentateur commande le dialogue à l'aide du message M3. Le véhicule de manœuvre demande l'autorisation (M7) de s'insérer à son meneur potentiel et à son suiveur potentiel (s'il existe). Dans l'éventualité où la manœuvre est autorisée (M11), le dialogue est un succès. Si le meneur ou le suiveur potentiel collabore déjà à une manœuvre, il émet le message M13 et le dialogue échoue. La sous-figure A.1b illustre ce cas de figure. Le véhicule doit être dans l'état *Agent libre* pour être sensible à ce dialogue. L'exécution réussie de ce dialogue amène le véhicule de manœuvre dans l'état *Approche* via la transition T2.

A.4 Procéder à l'insertion

Ce dialogue s'exécute préalablement au changement de voie du véhicule de manœuvre lors d'une insertion. Le futur suiveur du véhicule s'insérant dans le train initie le dialogue en spécifiant que l'espace nécessaire pour procéder à l'insertion est disponible (M8). Lors de la réception de ce message, le véhicule de manœuvre envoie le message M6 à l'expérimentateur et procède à l'insertion. Le véhicule passe de l'état *Approche* à l'état *Insertion* via la transition T3A.

A.5 Collaboration à l'insertion

Le dialogue *Collaboration à l'insertion* amène le meneur du train ou un véhicule membre du train à collaborer à une manœuvre d'insertion. La figure A.1 illustre l'échange des messages de ce dialogue. Lors de la réception de M7, le meneur ou le suiveur potentiel accepte de collaborer à la manœuvre en envoyant le message M11. L'exécution de ce dialogue amène le meneur ou le suiveur potentiel à l'état *Collaboration insertion* via les transitions T5A ou T5B. Pour être sensible au dialogue, les véhicules doivent être dans les

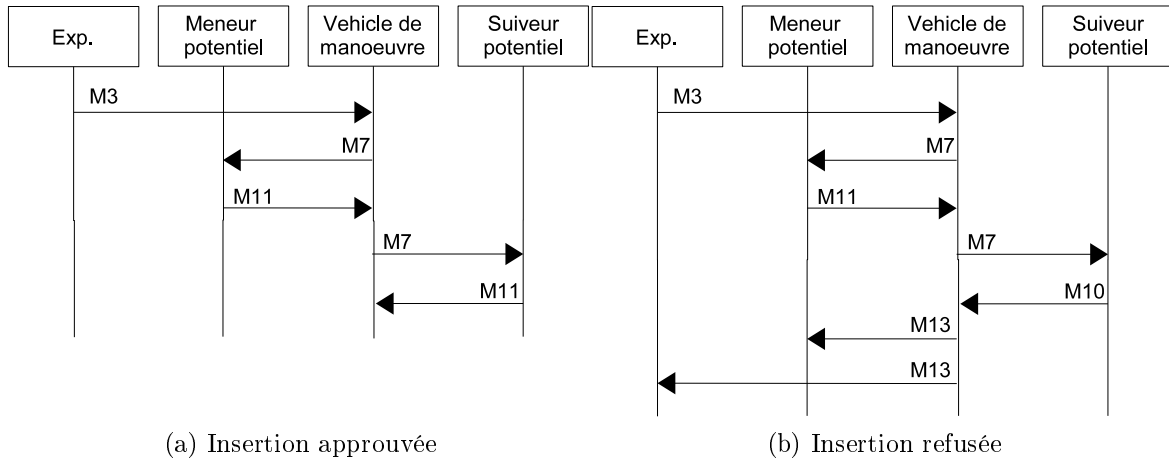


Figure A.1 Séquence des messages lors d'une insertion

états *Membre* ou *Meneur*. Ce dialogue est en quelque sorte un dialogue frère du dialogue *Insertion*.

A.6 Retrait

Le dialogue *Retrait* permet à l'expérimentateur de commander une manœuvre de retrait de la part d'un véhicule. Le véhicule doit être dans l'état *Membre* pour être sensible à ce dialogue. La figure A.2 illustre la séquence dans l'envoi des messages. La sous-figure A.2a présente un retrait approuvé, alors que la sous-figure A.2b présente un retrait refusé par le suiveur qui collabore déjà avec un autre véhicule. Dans l'éventualité où aucun suiveur ne serait présent (c.-à-d. : lors d'un retrait à l'arrière du train) les messages entre le véhicule de manœuvre et le suiveur ne sont pas échangés. L'exécution de ce dialogue amène le véhicule de manœuvre dans l'état *Retrait* via la transition T4.

A.7 Collaboration à un retrait

Le dialogue *Collaboration à un retrait* amène le meneur du train ou un autre véhicule membre du train à collaborer à une manœuvre de retrait. La figure A.2 illustre l'échange des messages de ce dialogue. Lors de la réception de M9, le meneur ou le suiveur accepte de collaborer à la manœuvre en envoyant le message M11. L'exécution de ce dialogue amène le meneur ou le suiveur potentiel à l'état *Collaboration retrait* via les transitions T6A ou T6B. Pour être sensible au dialogue, les véhicules doivent être dans les états *Membre* ou *Meneur*. Ce dialogue est en quelque sorte le dialogue frère du dialogue *Retrait*.

A.8 Collaboration sortie d'urgence

Lorsqu'un véhicule effectue une sortie d'urgence, les véhicules à proximité terminent leur collaboration existante et collaborent avec le véhicule qui quitte le train d'urgence. La

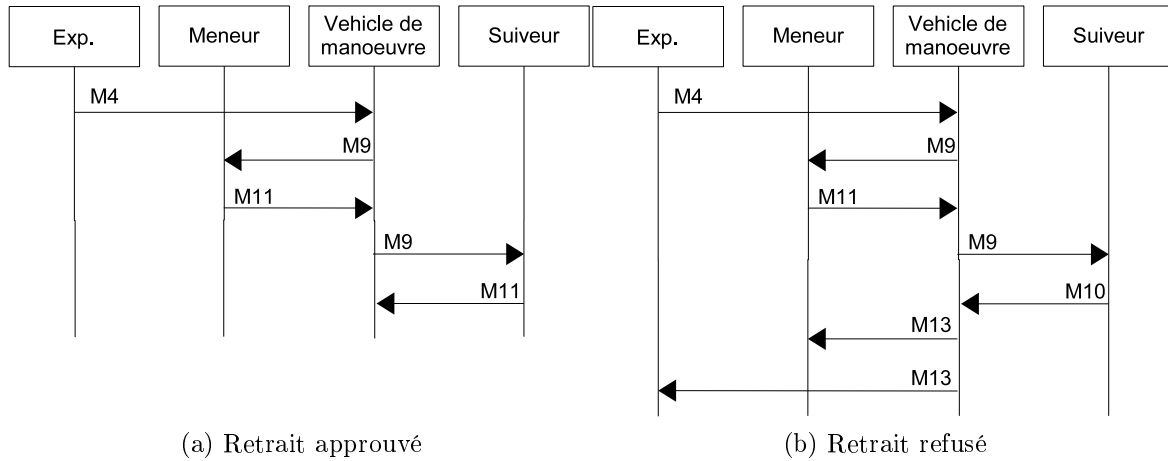


Figure A.2 Séquence des messages lors du retrait d'un véhicule

figure A.3 illustre les deux scénarios dans l'échange des messages relié à ce dialogue. La sous-figure A.3a illustre le cas général où un véhicule membre du train effectue une sortie d'urgence. Il informe son meneur et son suiveur avant de passer à l'état *Sortie d'urgence*. Le meneur et le suiveur passent à l'état *Collaboration retrait* via la transition T13. La sous-figure A.3b illustre le cas où un véhicule quitte d'urgence le train lorsqu'une manoeuvre d'insertion ou de retrait est en cours d'exécution. Puisque la collaboration à une sortie d'urgence est prioritaire, le meneur du véhicule quittant d'urgence (V3) relaie le message à son meneur (V1) et au véhicule de manoeuvre (V2). Sur la réception du message, V2 effectue à son tour une sortie d'urgence (transition T12), V1 redevient à l'état *Meneur* (transition T7A) ou *Membre* (transition T7B) et V3 collabore à la sortie de V4 en transitant à l'état *Collaboration retrait* (transition T13).

A.9 Fin de collaboration

Sur la réception du message M12 ou M13, un véhicule collaborant à une manoeuvre revient à l'état *Meneur* ou *Membre* à l'aide des transitions T7A ou T7B.

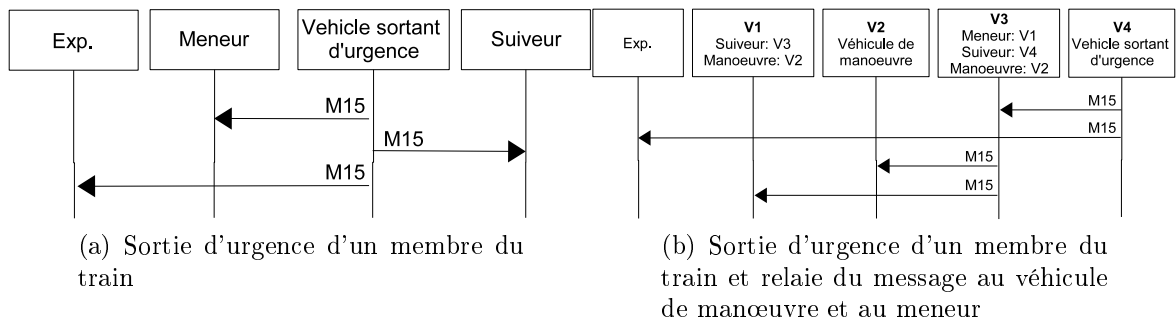


Figure A.3 Séquence des messages lors d'une sortie d'urgence

A.10 Urgence

Lorsqu'un véhicule subit une collision, il communique le message M16 aux véhicules à proximité. L'envoi du message s'effectue de la même façon que le message M15 utilisé pour les sorties d'urgence. Les véhicules relaient le message de façon identique aux sous-figures de la figure A.3. La transition T9 à T11 surviennent lors de la réception de ce message dépendamment de l'état actuel du véhicule.

A.11 Obstacle

Lorsqu'un véhicule est dans un des états suivants : *Membre*, *Approche*, *Insertion*, *Retrait*, *Sortie d'urgence*, *Manœuvre d'urgence*, *Collaboration insertion* ou *Collaboration retrait* ; il est sensible au message M14 signalant la présence d'un obstacle. L'emplacement de l'obstacle (c.-à-d. : gauche ou droite) est spécifié. Lorsque l'obstacle est évité, le même message est reçu par le véhicule avec l'emplacement *Aucun*. Le signalement des obstacles s'effectuent uniquement par le meneur du train. Chaque véhicule relaie le message à son suiveur et au véhicule avec lequel il collabore. Aucune transition d'état survient suite à l'exécution de ce dialogue.

A.12 Vitesse

Lorsque le meneur du train varie sa vitesse de croisière, il utilise le message M17 pour signaler sa nouvelle vitesse à son suiveur. Ce dernier relaie le message à son suiveur et ainsi de suite. Aucune transition d'état survient suite à l'exécution de ce dialogue.

ANNEXE B

TESTS ET RÉSULTATS

Tableau B.1 Messages échangés dans le test de l'insertion et du retrait (I).

T(s)	Jason	Lolitta	Veronica	Anita
1.0	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
1.99				Meneur potentiel
6.59				Meneur potentiel
13.55			Meneur potentiel	
13.92			<i>Ordre d'insertion</i>	
13.95	<i>Insertion ?</i>		Insertion ?	
13.95	Insertion(oui)		<i>Insertion(oui)</i>	
14.07		<i>Insertion ?</i>	Insertion ?	
14.07		Insertion(oui)	<i>Insertion(oui)</i>	
16.05				<i>Ordre d'insertion</i>
16.09		<i>Insertion ?</i>		Insertion ?
16.09		Insertion(non)		<i>Insertion(non)</i>
16.14				Insertion annulé
17.23				<i>Changement de vitesse</i>
24.31		Espace suffisant	<i>Espace suffisant</i>	
24.39			Début de l'insertion	
33.12	<i>Insertion terminée</i>	<i>Insertion terminée</i>	Insertion terminée	
36.53				<i>Ordre d'insertion</i>
36.54		<i>Insertion ?</i>		Insertion ?
36.54		Insertion(oui)		<i>Insertion(oui)</i>
38.24		Espace suffisant		<i>Espace suffisant</i>
38.37				Début de l'insertion
49.08		<i>Insertion terminée</i>		Insertion terminée

Tableau B.2 Messages échangés dans le test de l'insertion et du retrait (II).

T(s)	Jason	Lolitta	Veronica	Anita
59.42				<i>Ordre de retrait</i>
59.45		<i>Retrait ?</i>		Retrait ?
59.45		Retrait(oui)		<i>Retrait(oui)</i>
61.47			Ordre de retrait	
61.54	<i>Retrait ?</i>		Retrait ?	
61.54	Retrait(oui)		<i>Retrait(oui)</i>	
61.66		<i>Retrait ?</i>	Retrait ?	
61.66		Retrait(non)	<i>Retrait(non)</i>	
61.77	<i>Retrait annulé</i>		Retrait annulé	
78.27		<i>Retrait réussi</i>		Retrait réussi
78.36				Meneur potentiel
81.68			Ordre de retrait	
81.73	<i>Retrait ?</i>		Retrait ?	
81.73	Retrait(oui)		<i>Retrait(oui)</i>	
81.81		<i>Retrait ?</i>	Retrait ?	
81.81		Retrait(oui)	<i>Retrait(oui)</i>	
88.83	<i>Retrait réussi</i>	<i>Retrait réussi</i>	Retrait réussi	
88.83			Meneur potentiel	
96.77				Meneur potentiel
99.95			Meneur potentiel	
104.53	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.3 Transitions d'états dans le test de l'insertion et du retrait (I).

T(s)	Info.	Jason	Lolitta	Veronica	Anita
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Lolitta	Arrêt Arrêt Jason	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt
0.09	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Lolitta	Membre Suivi Jason	Autonome Recherche	Autonome Recherche
1.14	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome Recherche Jason Lolitta
5.73	État Comp. Meneur				Autonome Recherche Lolitta
12.62	État Comp. Meneur Suiveur			Autonome Recherche Jason Lolitta	
13.27	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. insertion Mener Lolitta Veronica	Coll. insertion Suivi Jason Veronica	Approche Suivi Jason Lolitta	
23.40	État Comp. Meneur Suiveur			Insertion Suivi Jason Lolitta	
25.23	État Comp. Meneur				Autonome Recherche Lolitta
32.13	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Veronica	Membre Suivi Veronica	Membre Suivi Jason Lolitta	
35.58	État Comp. Meneur Véhicule		Coll. insertion Suivi Veronica Anita		Approche Suivi
37.45	État Comp. Meneur				Insertion Suivi Lolitta
48.07	État Comp. Meneur Suiveur		Membre Suivi Veronica Anita		Membre Suivi Lolitta

Tableau B.4 Transitions d'états dans le test de l'insertion et du retrait (II).

T(s)	Info.	Jason	Lolitta	Veronica	Anita
58.47	État Comp. Meneur Véhicule		Coll. retrait Suivi Veronica Anita		Retrait Suivi Lolitta
60.61	État Comp. Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Lolitta Veronica			
60.78	État Comp. Suiveur	Meneur Mener Veronica			
77.28	État Comp. Meneur		Membre Suivi Veronica		Autonome Recherche Lolitta
78.47	État Comp. Meneur				Autonome Recherche Lolitta
80.74	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Lolitta Veronica	Coll. retrait Suivi Jason Veronica	Retrait Suivi Jason Lolitta	
87.83	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Lolitta	Membre Suivi Jason	Autonome Recherche	
87.92	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule			Autonome Recherche Jason Lolitta	
99.04	État Comp. Meneur			Autonome Recherche Lolitta	
103.63	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.5 Transitions d'états dans le test de collision du meneur.

T(s)	Info.	Jason	Anita	Lolitta	Veronica
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt Jason Veronica	Arrêt Arrêt Anita Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica
0.08	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Anita	Membre Suivi Jason Veronica	Membre Suivi Anita Lolitta	Membre Suivi Veronica
10.30	État Comp. Suiveur Collision	Arrêt d'urgence Collision	Man. d'urgence Man. d'urgence Veronica Jason		
10.44	État Comp. Meneur Suiveur			Man. d'urgence Man. d'urgence Anita Lolitta	
10.47	État Comp. Meneur Suiveur				Man. d'urgence Man. d'urgence Veronica
17.25	État Comp. Suiveur Collision		Man. d'urgence Arrêt Veronica Jason		
30.26	État Comp.		Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.6 Transitions d'états lors de la collision d'un membre du train.

T(s)	Info.	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt Jason Veronica	Arrêt Arrêt Anita Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica
0.08	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Anita	Membre Suivi Jason Veronica	Membre Suivi Anita Lolitta	Membre Suivi Veronica
10.37	État Comp. Meneur Suiveur Collision	Man. d'urgence Mener Veronica	Arrêt d'urgence Collision	Man. d'urgence Man. d'urgence Jason Lolitta Anita	
10.60	État Comp.				Man. d'urgence Man. d'urgence
18.06	État Comp. Meneur Suiveur Collision			Man. d'urgence Suivi Jason Lolitta Anita	
34.62	État Comp. Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Parcourir dist. Veronica Anita			
35.46	État Comp.	Arrêt Arrêt		Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.7 Transitions d'états lors du test de collision en aval d'une insertion.

T(s)	Info.	Jason	Veronica	Lolitta	Anita
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt Jason Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt
0.08	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Veronica	Membre Suivi Jason Lolitta	Membre Suivi Veronica	Autonome SeekPlatoon
5.46	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome SeekPlatoon Jason Veronica
21.16	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome SeekPlatoon Veronica Lolitta
21.68	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule		Coll. insertion Suivi Jason Lolitta Anita	Coll. insertion Suivi Veronica Anita	Approche Suivi Veronica Lolitta
31.19	État Comp. Meneur Suiveur				Insertion Suivi Veronica Lolitta
34.53	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Mener Anita Veronica	Arrêt d'urgence Collision	Man. d'urgence Man. d'urgence Anita Veronica	Man. d'urgence Man. d'urgence Jason Lolitta Veronica
42.88	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule				Man. d'urgence Suivi Jason Lolitta Veronica
59.17	État Comp. Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Parcourir dist. Anita Veronica			
64.99	État Comp.	Arrêt Arrêt		Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.8 Messages échangés lors du test de collision en amont d'une insertion.

T(s)	Jason	Veronica	Lolitta	Anita
0.08	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
5.94				Meneur potentiel
6.09				<i>Ordre d'insertion</i>
6.09	<i>Insertion ?</i>			Insertion ?
6.26	Manœuvre(oui)			<i>Manœuvre(oui)</i>
6.27		<i>Insertion ?</i>		Insertion ?
6.57		Manœuvre(oui)		<i>Manœuvre(oui)</i>
16.83		Espace suffisant		<i>Espace suffisant</i>
16.83				Debut d'insertion
20.20	<i>Arrêt d'urgence</i>	Arrêt d'urgence	<i>Arrêt d'urgence</i>	<i>Arrêt d'urgence</i>
44.57	Nouvelle vitesse	<i>Nouvelle vitesse</i>		<i>Nouvelle vitesse</i>
44.60			<i>Nouvelle vitesse</i>	Nouvelle vitesse
55.38	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.9 Transitions d'états lors du test de collision en amont d'une insertion.

T(s)	Info.	Jason	Veronica	Lolitta	Anita
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt Jason Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt
0.08	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Veronica	Membre Suivi Jason Lolitta	Membre Suivi Veronica	Autonome Recherche
5.18	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome Recherche Jason Veronica
5.27	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. insertion Mener Veronica Anita	Coll. insertion Suivi Jason Lolitta Anita		Approche Suivi Jason Veronica
15.99	État Comp. Meneur Suiveur				Insertion Suivi Jason Veronica
19.28	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Mener Anita Veronica	Arrêt d'urgence Collision	Man. d'urgence Man. d'urgence Anita Veronica	Man. d'urgence Suivi Jason Lolitta Veronica
43.65	État Comp. Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Parcourir dist. Anita Veronica			
54.50	État Comp.	Arrêt Arrêt		Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.10 Messages échangés lors du test test de collision en aval d'un retrait.

T(s)	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.08	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
11.11			<i>Ordre de retrait</i>	
11.11			Retrait ?	<i>Retrait ?</i>
11.19			<i>Manœuvre(oui)</i>	Manœuvre(oui)
11.20		<i>Retrait ?</i>	Retrait ?	
11.23		Manœuvre(oui)	<i>Manœuvre(oui)</i>	
15.35	<i>Arrêt d'urgence</i>	<i>Arrêt d'urgence</i>	<i>Arrêt d'urgence</i>	Arrêt d'urgence
17.70			Manœuvre terminée	
18.47			Meneur potentiel	
39.74	Nouvelle vitesse	<i>Nouvelle vitesse</i>		<i>Nouvelle vitesse</i>
45.28	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.11 Variation aux modèles pendant le test de retrait et collision en aval.

T(s)	Info.	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt Jason Veronica	Arrêt Arrêt Anita Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica
0.08	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Anita	Membre Suivi Jason Veronica	Membre Suivi Anita Lolitta	Membre Suivi Veronica
10.31	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule		Coll. retrait Suivi Jason Lolitta Veronica	Retrait Suivi Anita Lolitta	Coll. retrait Suivi Anita Veronica
14.41	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Mener Lolitta Anita	Arrêt d'urgence Collision	Sortie d'urgence Sortir d'urgence	Man. d'urgence Man. d'urgence Jason Anita
	État Comp.			Autonome Recherche	
16.92 17.69	État Comp. Meneur			Autonome Recherche Anita	
19.77	État Comp. Meneur Suiveur			Autonome Recherche Jason Lolitta	
38.74	État Comp. Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Parcourir dist. Lolitta Anita			
44.45	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt		Arrêt Arrêt

Tableau B.12 Messages échangés lors du test de collision en amont d'un retrait.

T(s)	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.11	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
11.10		<i>Ordre de retrait</i>		
11.13	<i>Retrait ?</i>	Retrait ?		
11.18	Manœuvre(oui)	<i>Manœuvre(oui)</i>		
11.25		Retrait ?	<i>Retrait ?</i>	
11.30		<i>Manœuvre(oui)</i>	Manœuvre(oui)	
15.30	<i>Arrêt d'urgence</i>	<i>Arrêt d'urgence</i>	Arrêt d'urgence	<i>Arrêt d'urgence</i>
18.14		Manœuvre terminée		
18.94		Meneur potentiel		
35.68		Meneur potentiel		
39.88	Nouvelle vitesse		<i>Nouvelle vitesse</i>	<i>Nouvelle vitesse</i>
45.29	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.13 Transitions d'états lors du test de collision en amont d'un retrait.

T(s)	Info.	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt Jason Veronica	Arrêt Arrêt Anita Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica
0.11	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Anita	Membre Suivi Jason Veronica	Membre Suivi Anita Lolitta	Membre Suivi Veronica
10.20	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Veronica Anita	Retrait Suivi Jason Veronica	Coll. retrait Suivi Jason Lolitta Anita	
14.38	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Mener Lolitta Veronica	Sortie d'urgence Sortir d'urgence	Arrêt d'urgence Collision	Man. d'urgence Man. d'urgence Jason Veronica
18.02	État Comp. Meneur Suiveur		Autonome Recherche Jason Veronica		
21.47	État Comp. Meneur Véhicule				Man. d'urgence Suivi Jason Veronica
21.74	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule		Autonome Recherche Jason Lolitta		
38.88	État Comp. Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Parcourir dist. Lolitta Veronica			
44.44	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt		Arrêt Arrêt

Tableau B.14 Messages échangés lors du test de collision sur le véhicule réalisant une insertion.

T(s)	Jason	Veronica	Lolitta	Anita
0.08	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
5.73				Meneur potentiel
5.96				<i>Ordre d'insertion</i>
6.01		<i>Insertion ?</i>		Insertion ?
6.10		Manœuvre(oui)		<i>Manœuvre(oui)</i>
6.13	<i>Insertion ?</i>			Insertion ?
6.13	Manœuvre(oui)			<i>Manœuvre(oui)</i>
16.60		Espace suffisant		<i>Espace suffisant</i>
16.84				Debut d'insertion
20.13	<i>Arrêt d'urgence</i>	<i>Arrêt d'urgence</i>		Arrêt d'urgence
20.20		Arrêt d'urgence	<i>Arrêt d'urgence</i>	
44.60	Nouvelle vitesse	<i>Nouvelle vitesse</i>		<i>Nouvelle vitesse</i>
44.60		Nouvelle vitesse	<i>Nouvelle vitesse</i>	
50.19	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.15 Variation des modèles pendant le test de collision sur le véhicule réalisant une insertion.

T(s)	Info.	Jason	Veronica	Lolitta	Anita
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt Jason Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt
0.08	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Veronica	Membre Suivi Jason Lolitta	Membre Suivi Veronica	Autonome Recherche
4.39	État Comp. Suiveur				Autonome Recherche Veronica
4.91	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome Recherche Jason Veronica
5.38	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. insertion Mener Veronica Veronica	Coll. insertion Suivi Jason Lolitta Anita		Approche Suivi Jason Veronica
15.95	État Comp. Meneur Suiveur				Insertion Suivi Jason Veronica
19.36	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Mener Veronica Anita	Man. d'urgence Man. d'urgence Jason Lolitta Anita		Arrêt d'urgence Collision Jason Veronica
19.73	État Comp. Meneur Véhicule			Man. d'urgence Man. d'urgence Veronica Anita	
22.25	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule		Man. d'urgence Suivi Jason Lolitta Anita		
43.83	État Comp. Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Parcourir dist. Veronica Anita			
49.68	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	

Tableau B.16 Messages échangés lors du test de collision sur le véhicule réalisant un retrait.

T(s)	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.09	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>	<i>Départ</i>
11.27		<i>Ordre de retrait</i>		
11.33	<i>Retrait ?</i>	Retrait ?		
11.43	Manœuvre(oui)	<i>Manœuvre(oui)</i>		
11.43		Retrait ?	<i>Retrait ?</i>	
11.61		<i>Manœuvre(oui)</i>	Manœuvre(oui)	
16.41	<i>Arrêt d'urgence</i>	Arrêt d'urgence	<i>Arrêt d'urgence</i>	
16.41			Arrêt d'urgence	<i>Arrêt d'urgence</i>
40.67	Nouvelle vitesse	<i>Nouvelle vitesse</i>	<i>Nouvelle vitesse</i>	
40.68			Nouvelle vitesse	<i>Nouvelle vitesse</i>
46.51	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.17 Variation des modèles pendant le test de collision sur le véhicule réalisant un retrait.

T(s)	Info.	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt Jason Veronica	Arrêt Arrêt Anita Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica
0.09	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Anita	Membre Suivi Jason Veronica	Membre Suivi Anita Lolitta	Membre Suivi Veronica
10.34	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Veronica Anita	Retrait Suivi Jason Veronica	Coll. retrait Suivi Jason Lolitta Anita	
15.46	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Mener Veronica Anita	Arrêt d'urgence Collision	Man. d'urgence Man. d'urgence Jason Lolitta Anita	
15.65	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule				Man. d'urgence Man. d'urgence Veronica Anita
19.09	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule			Man. d'urgence Suivi Jason Lolitta Anita	
39.67	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Man. d'urgence Parcourir dist. Veronica Anita			
45.74	État Comp.	Arrêt Arrêt		Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.18 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un membre.

T(s)	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.12	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>
10.44	<i>Sortie d'urgence</i>	Sortie d'urgence	<i>Sortie d'urgence</i>	
15.18	<i>Manœuvre terminée</i>	Manœuvre terminée	<i>Manœuvre terminée</i>	
40.52	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.19 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre.

T(s)	Info.	Jason	Anita	Veronica	Lolitta
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt Jason Veronica	Arrêt Arrêt Anita Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica
0.12	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Anita	Membre Suivi Jason Veronica	Membre Suivi Anita Lolitta	Membre Suivi Veronica
10.33	État Comp. Meneur Suiveur		Membre Sortir d'urgence Jason Veronica		
10.44	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Veronica Anita	Sortie d'urgence Sortir d'urgence Jason Veronica	Coll. retrait Suivi Jason Lolitta Anita	
15.18	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Veronica	Autonome Recherche	Membre Suivi Jason Lolitta	
40.52	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.20 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'une insertion.

T(s)	Jason	Veronica	Lolitta	Anita
0.11	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>
5.51				Meneur potentiel
20.12				Meneur potentiel
20.64				<i>Ordre d'insertion</i>
20.64		<i>Insertion ?</i>		Insertion ?
20.65		Manœuvre(oui)		<i>Manœuvre(oui)</i>
20.73			<i>Insertion ?</i>	Insertion ?
20.73			Manœuvre(oui)	<i>Manœuvre(oui)</i>
31.45			Espace suffisant	<i>Espace suffisant</i>
31.59				Debut d'insertion
34.87	<i>Sortie d'urgence</i>	Sortie d'urgence	<i>Sortie d'urgence</i>	<i>Sortie d'urgence</i>
43.10	<i>Manœuvre terminée</i>	Manœuvre terminée	<i>Manœuvre terminée</i>	
64.99	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.21 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'une insertion.

T(s)	Info.	Jason	Veronica	Lolitta	Anita
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt Jason Lolitta	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt
0.11	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Veronica	Membre Suivi Jason Lolitta	Membre Suivi Veronica	Autonome Recherche
5.51	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome Recherche Jason Veronica
20.12	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome Recherche Veronica Lolitta
20.64	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule		Coll. insertion Suivi Jason Lolitta Anita	Coll. insertion Suivi Veronica Anita	Approche Suivi Veronica Lolitta
31.45	État Comp. Meneur Suiveur				Insertion Suivi Veronica Lolitta
34.80	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule		Coll. insertion Sortir d'urgence Jason Lolitta Anita		
34.87	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Lolitta Veronica	Sortie d'urgence Sortir d'urgence Jason Lolitta	Coll. retrait Suivi Jason Veronica	Sortie d'urgence Sortir d'urgence
39.04	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome Recherche Veronica Lolitta
43.10	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Lolitta	Autonome Recherche Jason Lolitta	Membre Suivi Jason	
64.13	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.22 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'une insertion.

T(s)	Jason	Anita	Lolitta	Veronica
0.88	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>
17.00				Meneur potentiel
17.16				<i>Ordre d'insertion</i>
17.16	<i>Insertion ?</i>			Insertion ?
17.31	Manœuvre(oui)			<i>Manœuvre(oui)</i>
17.31		<i>Insertion ?</i>		Insertion ?
17.40		Manœuvre(oui)		<i>Manœuvre(oui)</i>
27.90		Espace suffisant		<i>Espace suffisant</i>
27.92				Debut d'insertion
30.25	<i>Sortie d'urgence</i>	Sortie d'urgence	<i>Sortie d'urgence</i>	<i>Sortie d'urgence</i>
38.24	<i>Manœuvre terminée</i>	Manœuvre terminée	<i>Manœuvre terminée</i>	
55.30	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.23 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'une insertion.

T(s)	Info.	Jason	Anita	Lolitta	Veronica
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt Jason Lolitta	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt
0.88	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Anita	Membre Suivi Jason Lolitta	Membre Suivi Anita	Autonome Recherche
17.00	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome Recherche Jason Anita
17.16	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. insertion Mener Anita Veronica	Coll. insertion Suivi Jason Lolitta Veronica		Approche Suivi Jason Anita
27.90	État Comp. Meneur Suiveur				Insertion Suivi Jason Anita
30.14	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule		Coll. insertion Sortir d'urgence Jason Lolitta Veronica		
30.25	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Lolitta Anita	Sortie d'urgence Sortir d'urgence Jason Lolitta	Coll. retrait Suivi Jason Anita	Sortie d'urgence Sortir d'urgence
36.57	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome Recherche Jason Lolitta
38.24	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Lolitta	Autonome Recherche Jason Lolitta	Membre Suivi Jason	
53.30	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.24 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'un retrait.

T(s)	Jason	Veronica	Anita	Lolitta
0.89	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>
11.30			<i>Ordre de retrait</i>	
11.30		<i>Retrait ?</i>	Retrait ?	
11.41		Manœuvre(oui)	<i>Manœuvre(oui)</i>	
11.41			Retrait ?	<i>Retrait ?</i>
11.51			<i>Manœuvre(oui)</i>	Manœuvre(oui)
15.39	<i>Sortie d'urgence</i>	Sortie d'urgence	<i>Sortie d'urgence</i>	<i>Sortie d'urgence</i>
23.04	<i>Manœuvre terminée</i>	Manœuvre terminée		<i>Manœuvre terminée</i>
45.55	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.25 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre en aval d'un retrait.

T(s)	Info.	Jason	Veronica	Anita	Lolitta
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt Jason Anita	Arrêt Arrêt Veronica Lolitta	Arrêt Arrêt Anita
0.89	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Meneur Mener Veronica	Membre Suivi Jason Anita	Membre Suivi Veronica Lolitta	Membre Suivi Anita
11.51	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule		Coll. retrait Suivi Jason Lolitta Anita	Retrait Suivi Veronica Lolitta	Coll. retrait Suivi Veronica Anita
15.32	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule		Coll. retrait Sortir d'urgence Jason Lolitta Anita		
15.39	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Lolitta Veronica	Sortie d'urgence Sortir d'urgence Jason Lolitta	Sortie d'urgence Sortir d'urgence	Coll. retrait Suivi Jason Veronica
19.38	État Comp.			Autonome Recherche	
23.04	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Lolitta	Autonome Recherche		Membre Suivi Jason
45.55	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.26 Messages échangés lors du test de sortie d’urgence d’un membre en amont d’un retrait.

T(s)	Jason	Veronica	Anita	Lolitta
0.87	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>
11.22		<i>Ordre de retrait</i>		
11.22	<i>Retrait ?</i>	Retrait ?		
11.31	Manœuvre(oui)	<i>Manœuvre(oui)</i>		
11.31		Retrait ?	<i>Retrait ?</i>	
11.51		<i>Manœuvre(oui)</i>	Manœuvre(oui)	
15.26	<i>Sortie d’urgence</i>	<i>Sortie d’urgence</i>	Sortie d’urgence	<i>Sortie d’urgence</i>
19.84	<i>Manœuvre terminée</i>		Manœuvre terminée	<i>Manœuvre terminée</i>
45.29	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.27 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un membre en amont d'un retrait.

T(s)	Info.	Jason	Veronica	Anita	Lolitta
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Veronica	Arrêt Arrêt Jason Anita	Arrêt Arrêt Veronica Lolitta	Arrêt Arrêt Anita
0.87	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Veronica	Membre Arrêt Jason Anita	Membre Suivi Veronica Lolitta	Membre Suivi Anita
11.51	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Anita Veronica	Retrait Suivi Jason Anita	Coll. retrait Suivi Jason Lolitta Veronica	
15.19	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule			Coll. retrait Sortir d'urgence Jason Lolitta Veronica	
15.26	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Lolitta Anita	Sortie d'urgence Sortir d'urgence	Sortie d'urgence Sortir d'urgence Jason Lolitta	Coll. retrait Suivi Jason Anita
18.50	État Comp.		Autonome Recherche		
19.84	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Lolitta		Autonome Recherche	Membre Suivi Jason
45.29	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

Tableau B.28 Messages échangés lors du test de sortie d'urgence d'un véhicule s'insérant dans le train.

T(s)	Jason	Anita	Lolitta	Veronica
0.80	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>	<i>Depart</i>
12.82				Meneur potentiel
12.98				<i>Ordre d'insertion</i>
12.98	<i>Insertion ?</i>			Insertion ?
13.14	Manœuvre(oui)			<i>Manœuvre(oui)</i>
13.14		<i>Insertion ?</i>		Insertion ?
13.22		Manœuvre(oui)		<i>Manœuvre(oui)</i>
22.22		Espace suffisant		<i>Espace suffisant</i>
22.22				Debut d'insertion
24.52	<i>Sortie d'urgence</i>	<i>Sortie d'urgence</i>		Sortie d'urgence
30.63	<i>Manœuvre terminée</i>	<i>Manœuvre terminée</i>		Manœuvre terminée
49.61	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Arrêt</i>

Tableau B.29 Variation des modèles pendant le test de sortie d'urgence d'un véhicule s'insérant dans le train.

T(s)	Info.	Jason	Anita	Lolitta	Veronica
0.00	État Comp. Meneur Suiveur	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt Jason Lolitta	Arrêt Arrêt Anita	Arrêt Arrêt
0.80	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Anita	Membre Suivi Jason Lolitta	Membre Suivi Anita	Autonome Recherche
12.82	État Comp. Meneur Suiveur				Autonome Recherche Jason Anita
13.14	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. insertion Mener Anita Veronica	Coll. insertion Suivi Jason Lolitta Veronica		Approche Suivi Jason Anita
22.22	État Comp. Meneur Suiveur				Insertion Suivi Jason Anita
24.43	État Comp. Meneur Suiveur				Insertion Sortir d'urgence Jason Anita
24.52	État Comp. Meneur Suiveur Véhicule	Coll. retrait Mener Anita Veronica	Coll. retrait Suivi Jason Lolitta Veronica		Sortie d'urgence Sortir d'urgence Jason Anita
30.63	État Comp. Meneur Suiveur	Meneur Mener Anita	Membre Suivi Jason Lolitta		Autonome Recherche
49.61	État Comp.	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt	Arrêt Arrêt

RÉFÉRENCES

- Albus, J. (Septembre 1998) 4-D/RCS : A reference model architecture for Demo III. Dans *ISIC/CIRA/ISAS '98 Conference*. Gaithersburg, MD. citeseer.ist.psu.edu/575811.html.
- Aoki, K., Mio, M., Nishida, M. et Tachibana, A. (1995) Steps forward. Dans *Intelligent Transport Systems World Conference*. p. 1272–1277.
- Arkin, R. (1998) *Behavior-Based Robotics*. The MIT Press.
- Arkin, R. et Balch, T. (1997) Aura : Principles and practice in review. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, volume 9, n° 2.
- Balch, T. et Arkin, R. (1998) Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, volume 14, n° 6, p. 926–939.
- Barth, M. et Norbeck, J. (1996) *Transportation modeling of the environment : Final report*. Research project UCB-ITS-PRR-96-6, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, CA 94720.
- Beaudry, E., Brosseau, Y., Cote, C., Raievsky, C., Letourneau, D., Kabanza, F. et Michaud, F. (2005) Reactive planning in a motivated behavioral architecture. Dans *Proceedings American Association for Artificial Intelligence Conference*.
- Briesemeister, L. (Nov. 2001) *Group Membership and Communication in Highly Mobile Ad Hoc Networks*. Thèse de doctorat, School of Electrical Engineering and Computer Science, Technical University of Berlin, Germany.
- Broggi, A., Bertozzi, M., Fascioli, A., Guarino, C., Bianco, L. et Piazzzi, A. (1999) The ARGO autonomous vehicle's vision and control system. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, volume 3, n° 4, p. 409–441.
- Chien, C., Zhang, Y. et Cheng, C. (1995) Autonomous intelligent cruise control using both front and back information for tight vehicle following maneuvers. Dans *Proceedings of the American Control Conference*, volume 5. p. 3091–3095.
- Cote, C., Letourneau, D., Michaud, F., Valin, J.-M., Brosseau, Y., Raievsky, C., Lemay, M. et Tran, V. (2004) Code reusability tools for programming mobile robots. Dans *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- Crawford, S. A. (2005) *Performance Evaluation of Sensor Combinations for Mobile Platform Control*. Mémoire de maîtrise, University of Calgary.
- DaimlerChrysler, GM, T. F. e. N. (Novembre 2004) *Enhanced Digital Mapping Project*. Final report, CAMP Enhanced Digital Maps IVI Light Vehicle Enabling Research Program.
- Gerkey, B., Vaughan, R. T. et Howard, A. (June 2003) The Player/Stage project : Tools for multi-robot and distributed sensor systems. Dans *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003)*. Coimbra, Portugal, p. 317–323.

- Godbole, D., Eskafi, F. et Varaiya, P. (1996) Automated highway systems. Dans IFAC (réd.), *IFAC 13th Triennial World Congress*. p. 121–126.
- Greenshields, B. (1934) A study in highway capacity. *Highway Research Record*, volume 14, p. 468.
- Grendel, J. (1993) *Sicherheitsanalyse im strassenverkehr*. Rapport technique, Bundersanstalt fr Strassenwesen, Mensch und Sicherheit.
- Griffith, J. (August 2008) *Development of a Low Level Autonomous Machine*. Mémoire de maîtrise, Department of Agricultural and Bioresource Engineering of the University of Saskatchewan.
- Hedrick, J., Sengupta, R., Xu, Q. et Kang, Y. (2003) *Enhanced AHS Safety Through the Integration of Vehicle Control and Communication*. Rapport technique, Mechanical Engineering Department, University of California at Berkeley, CA 94720.
- Heineman, G. T. et Councill, W. T. (2001) *Component-Based Software Engineering : Putting the Pieces Together*. Addison-Wesley Professional.
- Holzmann, F., BeHino, M., Kolskit, S., Sulzmann, A., Spiegelberg, G. et Siegwart, R. (Juin 2005) Robots go automotive - the SPARC approach. *Proceedings IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, p. 478–483.
- Horowitz, R. et Varaiya, P. (2000) Control design of an automated highway system. cseer.ist.psu.edu/horowitz00control.html.
- Huppé, X. (Octobre 2004) *Guidage et commande longitudinale d'un train de voitures adaptés aux conditions routières et climatiques canadiennes*. Mémoire de maîtrise, Département de génie électrique et de génie informatique de l'Université de Sherbrooke.
- Jones, W. (2001) Keeping cars from crashing. *IEEE Spectrum*, volume 38, n° 9, p. 40–45.
- Kato, S., Tsugawa, S., Tokuda, K., Matsui, T. et Fujii, H. (Sept. 2002) Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 3, n° 3, p. 155–161.
- Lacaze, A., Murphy, K. et DelGiorno, M. (2002) Autonomous mobility for the Demo III experimental unmanned vehicle. Dans *AUVSI Conference*.
- Laugier, C., Fraichard, T., Garnier, P., Paromtchik, I. et Scheuer, A. (1999) Sensor-based control architecture for a car-like vehicle. *Autonomous Robots*, volume 6, p. 165–185.
- Lemay, M. (2004) *Assignment dynamique de positions pour les déplacements en formation d'un groupe de robots*. Mémoire de maîtrise, Département de génie électrique et de génie informatique de l'Université de Sherbrooke.
- Létourneau, D., Vallin, J.-M., Côté, C. et Michaud, F. (2005) Flowdesigner : the free data-flow oriented development environment. *Software 2.0*, volume 3.

- Luo, J. et Hubeaux, J. (2004) *A Survey of Inter-Vehicle Communication*. Rapport technique IC/2004/24, School of Computer and Communication Sciences, EPFL, CH-1015 Lausanne, Switzerland.
- Michaud, F. (2002) EMIB - Computational architecture based on emotion and motivation for intentional selection and configuration of behavior producing modules. *Cognitive Science, Special Issue on Desires, Goals, Intentions and Values : Computational Architectures*, volume 2, n° 3/4, p. 340–361.
- Michaud, F., Lepage, P., Frenette, P., Letourneau, D. et Gaubert, N. (Déc. 2006) Coordinated maneuvering of automated vehicles in platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 7, p. 437–447.
- Oh, P., Packard, A. et Tongue, B. (1999) *A Parametric Study of Platoon Dynamics and Robust H₂ Controller Design*. Rapport technique UCB-ITS-PRR-99-40, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- Pallottino, L., Scordio, V., Bicchi, A. et Frazzoli, E. (Dec. 2007) Decentralized cooperative policy for conflict resolution in multivehicle systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, volume 23, n° 6, p. 1170–1183.
- Peden, M., Scurfield, R., Sleet, D., Mohan, D., Hyder, A., Jarawan, E. et Mathers, C. (2004) *Rapport mondial sur la prévention des traumatismes dus aux accidents de la circulation*. Rapport technique, Organisation mondiale de la Santé.
- Pommerleau, D. et Jochem, T. (Avril 1996) Rapidly adapting machine vision for automated vehicle steering. *IEEE Expert : Special Issue on Intelligent System and their Applications*, volume 11, n° 2, p. 19–27.
- Rajamani, R. et Shladover, S. (1999) An experimental comparative study of autonomous and co-operative vehicle-follower control systems. *Transportation Research Journal Part C : Emerging Technologies*, volume 9, n° 1, p. 15–31.
- Rivard, F. (Mars 2005) *Localisation relative de robots mobiles opérant en groupe*. Mémoire de maîtrise, Département de génie électrique et de génie informatique de l’Université de Sherbrooke.
- Santhanakrishnan, K. et Rajamani, R. (2003) On spacing policies for highway vehicle automation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 4, n° 4, p. 198–204.
- Seto, Y. et Inoue, H. (1999) Development of platoon driving in AHS. *JSAE Review*, volume 20, p. 93–99.
- Sheikholeslam, S. et Desoer, C. (1989) *Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles I : Linear Model*. Rapport technique UCB-ITS-PRR-89-03, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- Spooner, J. et Passino, K. (August 1997) Fault-tolerant control for automated highway systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, volume 46, p. 770–785.

- Stankovic, S., Stanojevic, M. et Siljak, D. (September 2000) Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, volume 8, n° 5, p. 816–832.
- Swaroop, D. (1997) *String Stability of Interconnected Systems : An Application to Platooning in Automated Highway Systems*. Thèse de doctorat, Institute of Transportation Studies California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH) (University of California, Berkeley).
- Swaroop, D. et Hedrick, J. (September 1999) Constant spacing strategies for platooning in automated highway systems. *Transaction of the ASME*, volume 121, p. 462–470.
- Swaroop, D. et Rajagopal, K. (1999) Intelligent cruise control systems and traffic flow stability. *Transportation Research Journal Part C : Emerging Technologies*, volume 7, n° 6, p. 329–352.
- Tan, H., Rajamani, R. et Zhang, W. (Juin 1998) Demonstration of an automated highway platoon system. *Proceedings of the American Control Conference*, p. 1823– 1827.
- Tan, H.-S., Guldner, J., Chen, C., Patwardhan, S. et Bougler, B. (2000) Lane changing with look-down reference systems on automated highways. *Control Engineering Practice*, volume 8, p. 1033–1043.
- Tanner, H., Pappas, G. et Kumar, R. (Juin 2004) Leader-to-formation stability. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, volume 20, n° 3, p. 443–455.
- Thorpe, C., Jochem, T. et Pomerleau, D. (1998) Automated highway and the free agent demonstration. *Robotics Research - International Symposium*, volume 8.
- Tsugawa, S., Kato, S., Matsui, T., Naganawa, H. et Fuji, H. (2000) An architecture for cooperative driving of automated vehicles. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, p. 422–427.
- Wang, J., Schroedl, S., Mezger, K., Ortloff, R., Joos, A. et Passegger, T. (Sep. 2005) Lane keeping based on location technology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 6, n° 3, p. 351–356.
- Warnick, S. et Rodriguez, A. (May 2000) A systematic antiwindup strategy and the longitudinal control of a platoon of vehicles with control saturations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, volume 49, n° 3, p. 1006–1016.
- Xiao-Yun Lu, Han-Shue Tan, D. E. S. E. S. J. K. H. (2000) *Nonlinear Longitudinal Controller Development and Real-time Implementation*. Rapport technique UCB-ITS-PRR-2000-15, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- Yanakiev, D. et Kanellakopoulos, I. (July 1996) A simplified framework for string stability analysis in AHS. Dans *Proceedings of the 13th IFAC World Congress*, volume Q. p. 177–182.
- Zabat, M., Stabile, N. et Browand, F. (1995) Estimates of fuel saving from platooning. Dans *ITS America Annual Meetings*. p. 1203–1208.

- Zhou, J. et Peng, H. (2005) Range policy of adaptative cruise control vehicles for improved flow stability and string stability. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 6, n° 2, p. 229–237.

